

Opinnäytetyö AMK

Työnjohdon koulutusohjelma

Rakennusmestari

2013

Marko Rantanen

PASSIIVITALON TIIVIYDEN TOTEUTUS JA TIIVIYDEN LAADUNVALVONTA



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Marko Rantanen

PASSIIVITALON TIIVIYDEN TOTEUTUS JA TIIVIYDEN LAADUNVALVONTA

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan passiivitalon tiiviyn toteuttamiseen ja laadunvalvontaan liittyviä haasteita ja ongelmien ratkaisuja. Tässä työssä tutkitaan Hartela Oy:n KVR-urakointina rakentamaa puurakenteisten pari- ja rivitalojen passiivirakennuskohdetta. Erilaiset tiivistystavat ja eri tiivistysmateriaalien käyttö esitellään. On tärkeää ymmärtää puurakenteisen passiivitalon ilmatiiviyeen liittyvät rakennusfysikaaliset ilmiöt, jotta voidaan välttyä home- ja kosteusriskeiltä.

Laadunvalvonnan osalta analysoidaan erilaiset rakentamisen aikaiset tarkastustavat ja menetelmät, joilla voidaan parantaa työnlaatua ja motivoida työntekijöitä. Rakentajien omavalvonta ja keinot ilmavuotojen etsimiseen ovat osana laadunvalvontaa. Rakentamisen aikainen tiiviysmittaus on yksi tärkeimmistä laadunvalvonnan mittareista, jolla kontrolloidaan ilmatiiviyn toteutumista.

Opinnäytetyössä selvitetään tiiviysmittaustuloksiin vaikuttavia tekijöitä, joita minimoimalla mittaustuloksista saadaan tarkempia. Kun vertaillaan rakentamisen aikaisten ja valmiiden asuntojen mittaustulosten erotuksia muuttujana asunnon tilavuus, korrelaatiokertoimeksi saadaan 0,65. Vaikka mittaustulosotanta on pieni, asunnon kokoa voidaan pitää yhtenä merkittävänä tekijänä mittauserojen muodostumisessa.

Rivitalokohteen tiiviys on saatu selville mittaamalla 20 % kaikista asunnoista, vähintään yksi asunto/talo. Mitattujen asuntojen tiiviysmittaustuloksista on laskettu keskiarvo, joka on kohteen ilmavuotoluku. Rakentamisen aikaisten ja valmiiden asuntojen mitattu ilmavuotoluku n50 on 0,5 1/h. Tällä tuloksella passiivitalon kriteeri toteutuu.

ASIASANAT:

Ilmatiiviys, ilmavuotoluku, tiiviyn toteutus, tiiviysmittaus, höyrynsulku, alapohja, yläpohja, seinärakenne, läpivienti

Marko Rantanen

EXECUTION AND QUALITY CONTROL OF AIR TIGHTNESS IN PASSIVE HOUSE BUILDING

This thesis surveys the challenges and problems encountered in the execution and quality control of air tightness in passive house building. The passive house construction site surveyed here is constructed by Hartela Oy as a turnkey project and it consists of timber duplex and row houses. Various sealing materials and methods are reviewed. It is important to understand the building physics phenomena related to the air tightness of a timber passive house so that mould and moisture risks can be avoided.

As to the quality control, the thesis analyses the various control methods employed during the construction that can be applied to improve the quality of work and to motivate the workers. The self-monitoring performed by the builders as well as their means to find air leakage gaps are a central part of the quality control. One of the most important quality control instruments is the leakage test applied to control that sufficient air tightness has been achieved.

The thesis tries to find out the factors affecting the test results. By minimizing these factors, the results can be made more accurate. When comparing the differences between the test results measured during construction and the results measured in the completed apartments, with the apartment volume as the variable, the correlation coefficient is 0.65. Although the sampling is small, the size of the apartment can be seen as an important factor explaining the differences in the test results.

The air tightness of a row house site has been assessed by measuring 20 per cent of all the apartments, the minimum being one apartment per house. The mean value of these measurements was calculated to determine the air leakage rate of the site. The air leakage rate n50 of the apartments measured during construction and when completed is 0.50 1/h. With this result, the passive house requirement is met.

KEYWORDS:

air tightness, air leakage rate, execution of air tightness, leakage test, vapour barrier, floor section, roof section, wall section, inlet

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	7
1.1 Tavoitteet	7
1.2 Yleistä projektista	7
1.3 Suunnittelu ja toteutus	8
1.4 Energiatehokkuus	9
2 PUURAKENTEISEN PASSIIVITALON RAKENTEET JA RAKENTAMISEEN LIITTYVÄT KÄSITTEET	10
2.1 Passiivitalon kriteerit	10
2.2 Puurakenteisen passiivitalon rakenne ja eristeet	10
2.3 Ilmatiiviys	14
2.4 Rakentamisen aikainen tiiviysmittaus	15
2.5 Tiiviysmittaukseen vaikuttavat tekijät	16
3 ILMATIIVYDEN TOTEUTUS	18
3.1 Alapohjan tiivistys	18
3.2 Seinärakenteen tiivistys	19
3.2.1 Ikkuna- ja oviaukot	21
3.2.2 Läpiviennit rungossa	22
3.2.3 Märkätilarakenne	23
3.2.4 Asuntojen väliset seinät	24
3.3 Yläpohjan tiivistys	24
3.3.1 Polyuretaanilevyn asennus	25
3.3.2 Yläpohjan läpiviennit	26
3.3.3 Yläpohjan yläpuoliset tiivistykset	28
4 LAADUNVALVONTA	30
4.1 Suunnittelu ja työtapo	30
4.2 Rakennusvaiheen tarkastukset ja tarkastuslistat	31
4.3 Ilmavuotojen paikannus ja toimenpiteet ennen tiiviysmittausta	33
4.4 Tiiviysmittaus osana laadunvalvontaa	34
5 TIIVIYSMITTAUSTULOSTEN TARKASTELU	36
5.1 Mittaustulosten arviointi	36

5.2 Mittaustulosten vertailu	37
5.3 Lämpötilaerot ja ilmanpaine	38
5.4 Lineaarinen riippuvuus	38
5.4.1 Tiiviysmittausten erotus ja asunnon tilavuus.	39
5.4.2 Rakentamisen aikaisen mittaustuloksen ja asunnon tilavuuden vertailu.	40
6 YHTEENVETO JA POHDINTA	43
6.1 Tiiviiden rakentaminen	43
6.2 Tiiviiden laadunvalvonta	43
6.3 Rakentamisen aikainen tiiviysmittaus	45
LÄHTEET	47

LIITTEET

Liite 1. Granlund Oy:n energiaselvitys
Liite 2. Granlund Oy:n energiaselvitys
Liite 3. Märkätiladetaljit
Liite 4. Käytetty höyrynsulkumassa
Liite 5. Höyrynsulkuteippi
Liite 6. Omavalvontalista
Liite 7. Työnjohtajan tarkastuslista
Liite 8. Koonti mittaustuloksista ja arvoista

KUVAT

Kuva 1. alapohjarakenne.	11
Kuva 2. Seinärakenne.	12
Kuva 3. Yläpohjarakenne.	13
Kuva 4. Bitumikaista asennettu sokkelin ja tuulensuojalevyn rajaan.	19
Kuva 5. Höyrynsulkumuovi asennettuna runkoon.	20
Kuva 6. Höyrynsulun kiristys nurkassa.	20
Kuva 7. Höyrynsulkumassa.	21
Kuva 8. Kulmavahvikepala.	21
Kuva 9. Karmin tiivistys höyrynsulkuun.	22
Kuva 10. Itseliimautuva läpivientitiiviste.	22
Kuva 11. Läpivientilaippa.	23
Kuva 12. Märkätilan SPU AL -seinärakenne vaahdotettuna.	24
Kuva 13. Vesihöyry tiivistynyt rakenteeseen.	25
Kuva 14. Polyuretaanilevyn asennus.	26
Kuva 15. Höyrynsulkumuovin teippaus.	27
Kuva 16. Asennettu ja massattu ilmastointiputki.	27

Kuva 17. Polyuretaanilevyn ja rungon yläjuoksun vaahdotus.	28
Kuva 18. Tiivistysvaahdotus	29
Kuva 19. Tiivistysvaahdotus.	29
Kuva 20. Eri tasossa olevien asuntojen välisen seinän yläliitos.	32
Kuva 21. Mittauslaitteistot vierekkäisissä asunnoissa.	35

KUVIOT

kuvio 1. Mittaustulosten erotuksen ja asunnon tilavuuden vertailu.	39
kuvio 2. Rakentamisen aikaisen n50 mittaustuloksen ja asunnon tilavuuden vertailu.	41
kuvio 3. Suurin ja pienin asunto poistettu.	42

TAULUKOT

Taulukko 1. Mittaustulosten erotus ja asunnon tilavuus.	39
Taulukko 2. Rakentamisen aikaiset n50 tiiviysmittaustulokset ja asuntojen tilavuus.	40

1 JOHDANTO

1.1 Tavoitteet

Tässä työssä käsitellään passiivitalorakentamista ja siihen kuuluvaa laadunvalvontaa sekä laadunvalvontaan liittyvää tiiviysmittausta. Opinnäytetyön tavoitteena on esitellä tiiviyn toteutus valokuvien ja mittausteknisin tuloksien sekä tuoda esille rakentamisen aikaisen tiiviysmittauksen tärkeys osana laadunvalvontaa.

Tiiviyn toteutuksen rakennusvaiheinen ja tehtäväkohtainen käsittely antaa kokonaiskuvan passiivirakentamisen haasteellisuudesta. Laadunvalvonnan kannalta passiivitalorakentaminen on kokonaan uusi alue. Tästä johtuen joudutaan kehittämään uusia laadunvalvonnan työkaluja, kuten esim. omavalvontaa, jonka tarkoituksena on pitää yllä rakentajien motivaatiota sekä kohdentaa ja tarkentaa riskikohtien toteutusta.

Rakentamisen aikaiset tiiviysmittaukset ja niiden antama välitön tieto ongelmista ja riskeistä muodostui osaksi laadunvalvontaa. Tämä 15 kuukautta kestänyt Hartela Oy:n KVR-urakkana toteuttama puurakenteisten passiivitalojen rakennusprojekti tuo esille passiivitalorakentamisen erityispiirteet sekä rakennustekniset ongelmat, jotka tulee ottaa huomioon rakentamisen aikana ja rakennuskohteen suunnitteluvaiheessa.

1.2 Yleistä projektista

Kohteen rakennuttaja on Varsinais-Suomen Asumisoikeus Oy. KVR-urakoitsijana on toiminut Hartela Oy. Pääsuunnittelusta on vastannut Arkkitehtuuritoimisto Kimmo Lylykangas Oy. Muut suunnittelusta vastaavat toimijat ovat rakennesuunnittelutoimisto Narmaplan Oy, LVI-suunnittelu Ins. Tsto Petri Vuorela Oy ja sähkösuunnittelu Sähkö ins. tsto Matti Leppä Oy.

Vason Soininen-kiinteistö on ensimmäinen suomalaisilla passiivitalokriteereillä toteutettu pari- ja rivitalokiinteistö. Talotyyppinä ovat 1–2-kerroksiset puurakenteiset pari- ja rivitalot. Asuntoja on yhteensä 38 kappaletta, ja niiden koot ovat 53–114 m². Soinisten alue sijaitsee Naantalissa, Naantalin 30. kaupunginosan korttelissa 14 tontilla 1.

1.3 Suunnittelu ja toteutus

Suunnittelussa on otettu huomioon suomalaisen passiivitalon kriteerit, joilla on määritelty passiivitalon lämmitysenergian enimmäistarve, jonka tulee olla pienempi kuin 20 kWh/m²/vuosi. Kokonaisprimäärienergian tarve on pienempi kuin 130 kW/m²/vuosi. Ilmavuotoluku on $n_{50} \leq 0,6$ 1/h.

"RAKLI toteutti Varsinais-Suomen Asumisoikeus (Vaso) Oy:n tilauksesta Vaso/Soininen-klinikan, joka oli osa Tekes- ja ARA -rahoitteista kehitysprojektia "Energiatehokas asumisoikeuspientaloalue: kehittämismalli tuotantoa ja käyttöä varten". Projektissa suunniteltiin ja toteutettiin energiatehokkuudeltaan passiivitaloluokkaan kuuluva asumisoikeuspientalojen alue Naantalin Soinisiin. Klinikassa toteutettiin kehittämismalli energiatehokkaan asumisoikeuspientaloalueen tuotantoa ja käyttöä varten sekä luotiin menetelmä, jonka avulla tulevia asukkaita voidaan kannustaa asuntojen oikeassa käytössä" (Rakli 2010)

Muita yhteistyökumppaneita ovat Naantalin kaupunki, Arkkitehtuuritoimisto Kimmo Lylykangas Oy, Energia- asiantuntijana Olof Granlund Oy ja rakennuttajakonsulttina Pöyry CM Oy.

Hartela Oy:n tarjousvaiheen suunnitelman mukaan asuntojen lämmitys on järjestetty pääasiassa sähköisellä tuloilmalämmityksellä, jota tukee huoneistokohmainen tulo- ja poistoilmanvaihto lämmöntalteenotolla. Asunnoista löytyy myös yksi sähkölämmityspatteri sähkösuunnitelman mukaan.

Jokainen asunto on varustettu katolla sijaitsevalla aurinkokeräimellä, jonka tuottamalla lämpöenergialla voidaan tuottaa lähes puolet lämpimän käyttöveden vaatimasta energiasta.

1.4 Energiatehokkuus

Asuintalot on suunniteltu tontille siten, että oleskelutilojen ikkunat avautuvat pääasiassa etelään päin. Rakennusten energiatehokkuus perustuu suurimmalta osin seuraaviin tekijöihin:

Taloissa on tehokas passiivisen aurinkoenergian hyväksikäyttö sekä erittäin hyvin eristetyt ulkoseinät, ala- ja yläpohja. Ulkovaipan läpi on erittäin vähäinen ilmavuoto. Huoneistokohtaiset tehokkaat lämmöntalteenottojärjestelmät ja suu-
rehkot 6 m²:n aurinkokeräimet käyttöveden lämmittämiseen alentavat huomattavasti primäärienergian ostotarvetta.

Asuntojen keskimääräinen lämmityssähköenergian ostotarve on 13 KWh/brm²/a ja muun sähköenergian ostotarve on 22,4 KWh/brm²/a. Lämpimän käyttöveden ostotarve on 29,9 KWh/brm²/a ja primäärienergian tarve on 111 KWh/brm²/a. (Insinööritoimisto Olof Granlund Oy.2013. liitteet 1 ja 2.)

Energialaskennoissa on käytetty Rakentamismääräyskokoelman 2012 osan D3 määrittämää standardikäyttöä, jossa lämpökuormat on annettu nettopinta-alalle. Asuntojen standardikäytön sisäiset lämpökuormat pien- ja rivitaloille perustuvat käyttöaikaan vuodessa ja käyttöasteeseen sekä nettopinta-alaan. Näiden perusteella on määritetty ihmisten, laitteiden ja valaistuksen lämpökuormat. Käyttöaika esittää, kuinka monta tuntia päivässä ja kuinka monta päivää viikossa rakennusta käytetään. Käyttöaste on keskimääräinen valaistuksen ja kuluttajalaitteiden käyttöaste sekä ihmisten läsnäolo rakennuksen käyttöajan aikana. (D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma.2007.)

Passiivitalon lämmitys perustuu sekundäärisiin lämmön lähteisiin, kuten ihmisten, valaistuksen ja käyttölaitteiden tuomaan hukkalämpöön sekä tehokkaaseen lämmöntalteenottojärjestelmään.

2 PUURAKENTEISEN PASSIIVITALON RAKENTEET JA RAKENTAMISEEN LIITTYVÄT KÄSITTEET

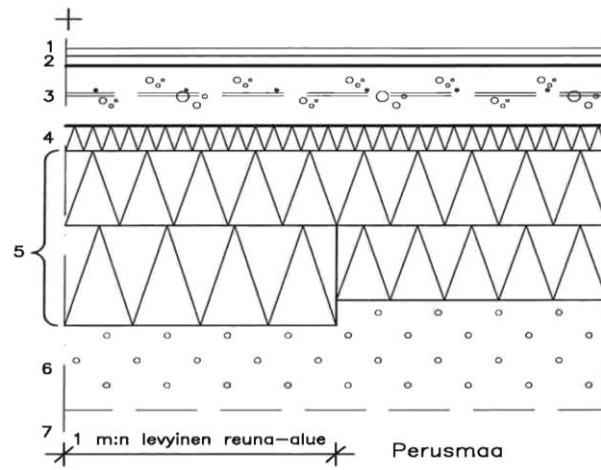
2.1 Passiivitalon kriteerit

Aloita Suomessa passiivitalo määritellään siten, että Etelä-Suomessa passiivitalon lämmitysenergiatarve tulee olla pienempi kuin 20 KWh/ m². Kokonaisprimäärienergian tarve on 130 KWh/m² ja ilmavuotoluku on $n_{50} \leq 0,6$ 1/h. Enimmäislämmönläpäisykertoimet eli u-arvot eri rakenteille ovat seuraavat: alapohja < 0,1 W/m², seinärakenne < 0,15 W/m² ja yläpohja < 0,15 W/m². (Kouhia ym. 2013, 10.) Eristepaksuutta ei ole erikseen määritetty, vaan se riippuu käytettävästä eristemateriaalista.

2.2 Puurakenteisen passiivitalon rakenne ja eristeet

Kosteusteknisesti lämmöneristeen lisääminen maanvastaiseen alapohjaan on hyvä asia, koska maapohja jäähtyy ja riski alapohjan läpi alhaalta ylöspäin tapahtuvan vesihöyryn diffuusion aiheuttamille kosteusongelmille alapohjassa vähenee (Lahdensivu ym. 2012, 84.).

Puurakenteisen passiivitalon alapohjassa eristeenä on käytetty EPS-levyjä, jotka on limitetty siten, että maanhuokoisilma ei pääse virtaamaan suoraan betonilaatan alle. U-arvoksi rakenteelle on saatu reuna-alueella perusmaasta riippuen 0,073–0,076 W/m². Sisäalueen U-arvo on 0,069–0,075 W/m².(kuva 1.)



- 1 ~ 15 mm pintamateriaali ja -käsittely huoneselityksen mukaan
- 2 20 mm tasoite
- 3 120 mm maanvarainen teräsbetonilaatta rakennepiirustusten mukaan (By 45 luokka A-4-30)
- 4 50 mm Solupak EPS 200 Lattia, $\lambda_d=0.033$ W/mK
- 5 Solupak EPS 100 Lattia Carbon taulukon mukaan, $\lambda_d=0.032$ W/mK, eristekerrokset limitettävä
- 6 salaojakerros, tiivistetty pesty sepeli >300 mm, raekoko 8-16 mm
- 7 perusmaa, kallistettu salaojiin

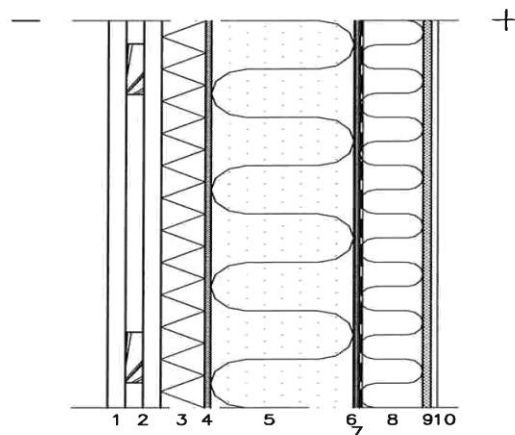


Salaojakerroksen alle suodatinkangas, jos perusmaa on savi tai siltti.

U-arvot				
	Reuna-alue, 1 m:n kaista		Sisäalue	
perusmaa:	Eristepaksuus	U-arvo	Eristepaksuus	U-arvo
kallio	350 mm	0.076 W/m ² K	350 mm	0.071 W/m ² K
hiesu, hietä, moreeni	350 mm	0.075 W/m ² K	300 mm	0.075 W/m ² K
savi, hiekka, sora	350 mm	0.073 W/m ² K	300 mm	0.069 W/m ² K

Kuva 1. alapohjarakenne.

Seinärakenne on toteutettu kolmella eri eristekerroksella: tuulensuojavillalla, kantavassa rungossa olevalla puhalluslasivillalla ja höyrynsulkumuovin sisäpuolella olevalla mineraalivillalla. Höyrynsulku on toteutettu 0,2 mm:n SFS luokka E höyrynsulkumuovilla. Seinärakenteen eristeestä 75 % sijaitsee höyrynsulkumuovin ulkopuolella. Eristeiden kokonaispaksuus on 395 mm ja U-arvoksi on saatu 0,093 W/m².(kuva 2.)



- 1 28 mm lautaverhous + pintakäsittely arkkitehdin mukaan
- 2 ristikoolaus 28x100 k600 + 28x100 k600 + tuuletusväli
- 3 70 mm tuulensuojavilla Paroc Renova tai Cortex, $\lambda_d=0.033$ W/mK, asennus valmistajan ohjeiden mukaan
- 4 9 mm tuulensuojakipsilevy Gyproc GTS 9
- 5 225 mm Knauf Perimeter Plus puhalluslasivilla (tiheys 26 kg/m³) $\lambda_d=0.034$ W/mK + asennuskangas, asennus valmistajan ohjeen mukaan + 50x225 k600
- 6 9 mm havuvaneri
- 7 0.2 mm höyrynsulkumuovi SFS luokka E, limitys 200 mm runkotolpan kohdalla + saumojen teippaus
- 8 100 mm mineraalivilla Paroc eXtra Plus, $\lambda_d=0.034$ W/mK + kantava runko 50x100 k600
- 9 13 mm kipsilevy
- 10 pintakäsittely huoneselityksen mukaan

U-arvo=0.093 W/m²K

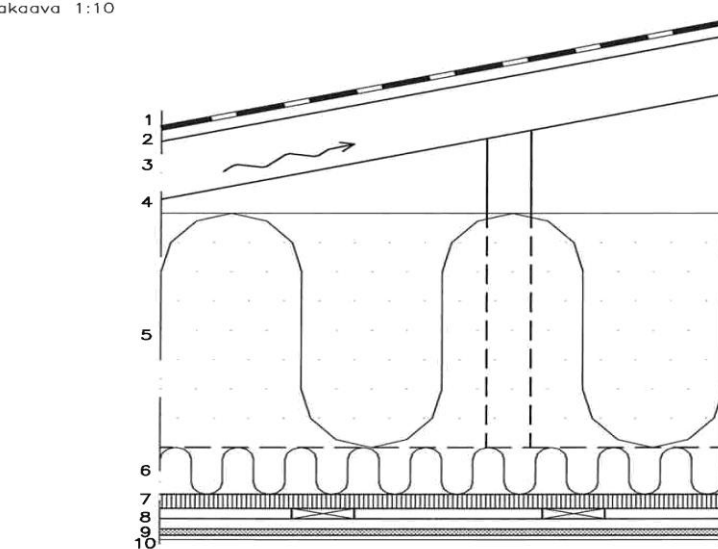
Puuverhouksen laatuvaatimukset, paksuudet ja kiinnitykset RunkoRYL 2000 kohdan 512 mukaan.

Ristikoolaus kiinnitetään tuulensuojavillalevyn läpi tyyppihyväksytyillä naulausvälikkeillä vähintään 4 kpl/m² valmistajan ohjeen mukaan.

Kuva 2. Seinärakenne.

Yläpohjan höyrynsulkuna ja lämmönjakokerroksena on käytetty 30 mm:n polyuretaanilevyä. Kylmän osan lämmöneristeenä on käytetty 580 mm:n paksuudelta mineraalivillaa. U-arvoksi on saatu 0,06 W/m². (kuva 3.)

Mittakaava 1:10



- 1 kumibitumikermieristys RT 85–10894 ja arkkitehdin mukaan
 2 ≥ 18 mm katevaneri tai raakaponttilaudoitus RT 85–10894 mukaan
 3 puukannattajat rakennesuunnitelmien mukaan k900
 4 >100 mm tuuletettu ilmatila, räystäällä tuulenohjain
 5 480 mm puhallusvilla Paroc BLT 6, $\lambda_d=0.040$ W/mK
 6 100 mm mineraalivilla Paroc eXtra Plus, $\lambda_d=0.034$ W/mK
 7 30 mm SPU AL polyuretaanilevy, mekaaninen kiinnitys ja saumojen vaahdotus valmistajan ohjeen mukaan, saumojen teippaus
 8 22x100 + 22x100 k400 ristikoolaus
 9 13 mm kipsilevy kaikkialla, myös alakattotiloissa
 10 pintakäsittely huoneselityksen mukaan

U-arvo=0.060 W/m²K

Vesikatteen on oltava luokkaa B_{ROOF}(t2).

Vesikaton bitumikermikatteen ohjeet, pellitykset yms.
 RT 85–10894, RT 85–10799 ja RT 80–10632 mukaan

Sadevesi-, tuuletus-, ym.putkien läpiviennit tiivistetään kumisin läpivientiholkein myös höyrynsulkuun.

Bitumikermiä kiinnitetään mekaanisilla kiinnikkeillä jokaisesta saumasta k500 yleensä. Tuulelta suojatuissa rakennuksissa kiinnitys keskialueella joka kolmannesta saumasta k500, ja joka saumasta räystäällä ja rakennuksen nurkissa. Kiinnikkeinä käytetään 40 mm ruuveja ja 30x30 aluslevyjä.

Kuva 3. Yläpohjarakenne.

2.3 Ilmatiiviys

Ilmatiiviys tarkoittaa rakennuksen ulkovaipan kykyä estää haitallinen ilmanvaihtuvuus rakenteen eri kerrosten läpi. Ulkovaipan sisäpinta erottaa rakennuksen sisätilat kylmästä ulkoilmasta. (Paloniitty 2012, 15.)

Eristeen paksuudesta johtuen höyrynsulun tulee olla riittävän tiivis, jotta kosteuden konvektiota ei pääse syntymään mahdollisessa ylipainetilanteessa. Ilma-
vuodon kautta kulkeutuu aina myös ilman sisältämää vesihöyryä. Paksussa eristekerroksessa, jolla on yhtenäinen huokosverkosto, ilmiötä kutsutaan rakenteen sisäiseksi konvektioksi, joka aiheutuu rakenteen pintojen välisistä paineeroista (Krankka 2013).

Diffuusiota ilmenee höyrynpaineen erojen seurauksena. Nämä erot puolestaan aiheutuvat kahden kohteen vesihöyrypitoisuuden välisistä eroista. Lämmityskaudella tämä höyryn liike kuljettaa vesihöyryä rakennuksen vaipan läpi, missä se voi tiivistyä kylmille pinnoille. (Paroc 2013.)

Tämä ilmiö on erityinen riski rakentamisen aikana talvella, kun käytetään rakennuslämmittimiä, jolloin koneellisen ilmanvaihdon luomaa alipainetta ei välttämättä synny rakennuksessa. Höyrynsulkua käytetään vaipan sisäpuolella estämään kosteuden etenemistä. Kosteuden tiivistymistä ei yleensä esiinny, jos höyrynsulun ulkopuolella on kaksi kolmasosaa seinän eristysarvosta. (kuva 2.)

Savupiippuilmion muodostuminen kaksikerroksisessa tiiviissä ja suljetussa tilassa on mahdollista, kun ilmanvaihdolla ei ole luotu alipainetta rakennukseen. Paineen neutraaliakseli muodostuu talon vertikaalisuunnassa puoliväliin. Neutraaliakselin alapuolelle syntyy alipaine ja yläpuolelle ylipaine. Ylipaine pyrkii työntämään lämmintä sisäilmaa rakenteisiin rakenteissa olevista rei'istä. (Tuomisto 2011.)

Lämmöneristysten lisääntyessä rakenteiden ulko-osissa lämpötila laskee ja suhteellinen kosteus nousee mahdollistaen entistä useammin kosteuden tiivis-

tymisen rakenteeseen ja tehden homeen kasvulle otolliset olosuhteet. Koska rakenteiden läpi johtuva kuivattava lämpövirta pienenee suorassa suhteessa U-arvojen alenemisen kanssa, rakenteet kastuvat useammin ja enemmän, ja kosteuden poistuminen kuivumalla hidastuu. (Lahdensivu ym. 2012, 10) Tätä ilmiötä voidaan korjata lisäämällä lämmöneristepaksuutta tuulensuojalevyn ulkopuolelle (kuva 2). (Lahdensivu ym. 2012, 31).

Rakennuksen vaipan ilmatiiviys vaikuttaa suoraan rakennuksen energiatehokkuuteen. Passiivitalojen luokituksessa on määritetty, että ilmavuotoluvun n_{50} tulee olla $\leq 0,6$ 1/h (q_{50} -luvulle ei ole annettu määrittelyä). Ilmavuotoluku n_{50} mittaa, kuinka monta kertaa rakennuksen ilma vaihtuu tunnissa vaipassa olevien vuotojen kautta 50 Pa:n paine-erolla (1/h). Ilmavuotoluku q_{50} mittaa, kuinka monta kuutiota ilmaa virtaa tunnissa asunnon vaipparakenteen läpi vaipan pinta-alaan nähden [$\text{m}^3/(\text{h m}^2)$]. (Paloniitty 2012, 15.)

Vaipan hyvä ilmatiiviys on saavutettavissa huolellisella rakenteiden ja liitosten valinnalla ja suunnittelulla sekä huolellisella liitosten ja läpivientien toteutuksella. Määräystasoa parempi ilmatiiviys tulee aina osoittaa kohteessa tehtävin mittauksin. Käytännössä tämä tarkoittaa mittauksen suorittamista useammassa vaiheessa rakennustöiden edetessä, jotta mahdolliset epätiiviyskohdat löydetään ja voidaan tiivistää ajoissa ennen lopullisten pintojen valmistumista. (Lahdensivu ym. 2012, 15.)

2.4 Rakentamisen aikainen tiiviysmittaus

Kaikki mitattavat asunnot mitataan sekä alipaineella ja ylipaineella. Suomessa rakennuksen tiiveyttä mitataan lähinnä alipainemenetelmällä, jossa rakennukseen aiheutetaan 50 Pa:n alipaine rakennuksen ulkoiseen paineeseen nähden. Alipaine saadaan aikaan puhallinlaitteistolla. Alipaineen ylläpitämiseksi tarvittava ilmamäärä mitataan. Ilmamäärä jaettuna tutkittavan tilan ilmatilavuudella antaa tulokseksi ns. ilmavuotoluvun n_{50} , tai ilmamäärä jaetaan vaipan alalla, jolloin tulokseksi saadaan ilmavuotoluku q_{50} . Rakennuksen ilmanpitävyyden mit-

taaminen painekoemenetelmällä on esitetty standardissa SFS EN 13829. Standardissa käytetään mittausmenetelmää B (rakennuksen vaipan testaus) siten, että rakennukseen tarkoituksellisesti ilmanvaihtoa varten tehdyt aukot suljetaan tiiviisti tarvittaessa teippaamalla. Täytyy muistaa, että rakentamisen aikaiset mittaukset ovat osa laadunvalvontaa mutta eivät virallisia ja lopullisia mittauksia, joiden perusteella voisi tehdä esim. energiatodistuksen. (Paloniitty 2012, 29– 30.)

Rakennuksesta mitataan kaikki ilmanpitävän vaipan sisäpuolella olevat tilat, jotka ovat lämpimiä tai viileitä ja joissa on koneellinen ilmanvaihto.

Ilmavuotoluvun laskennassa käytettävä rakennuksen sisätilavuus lasketaan rakentamismääräyskokoelmassa D5 määritetyn rakennuksen ilmatilavuuden mukaan. (Suomen rakennusmääräyskokoelma D5, 2007.)

”Rakennuksen ilmatilavuus on huonekorkeuden ja kokonaissisämittojen mukaan lasketun pinta-alan tulo. Välipohjia ei lasketa rakennuksen ilmatilavuuteen. Vaipan alaan lasketaan ulkoseinien pinta-ala sisämittojen mukaan laskettuna sekä yläpohjan ja alapohjan ala. Aukkoja ei vähennetä vaipan alasta.”(V. Vairinen, henkilökohtainen tiedonanto.26.3.2013)

2.5 Tiiviysmittaukseen vaikuttavat tekijät

Tiiviysmittaustuloksia tarkasteltaessa täytyy ottaa aina huomioon muuttuvia tekijöitä, kuten ilmanpaine, tuulen voimakkuus, sisätilan ja ulkoilman lämpötilaero sekä inhimilliset mittausvirheet laskettaessa mittauksessa tarvittavia lukuja.

Virheprosentit ovat tyypillisesti 3–10 % valmiilla tiiviysmittauslaitteistolla mitattaessa. Mittausvirhe koostuu ilmamäärän mittausvirheestä sekä rakennuksen suureiden mittausvirheistä. Ilmamäärän mittauksen virhe on melko pieni, yleensä alle 3 % (Paloniitty 2012, 57). Ilmamäärän mittausvirhe lasketaan ohjelmistossa, joka perustuu mittaussarjan tulosten keskihajontaan. Todellista virhettä muodostuu rakennusten suureiden mittaamisessa. Virheprosentin suuruus riippuu vaipan alan ja ilmatilavuuden laskemisen osalta laskentatavasta: kuinka monta kertaa suureet on laskettu ja kuinka monen eri henkilön tekemänä, onko suureet tarkistettu piirustuksesta ja paikan päällä kohteessa jne. Mitä useampi laskutoimitus ja tarkistus, sitä pienempi on virhemarginaali. Tiiviysmittaajan tu-

lee arvioida lopullinen virhe ottaen huomioon sääolosuhteet, suureiden mittausvirhe, ilmamäärän mittausvirhe ja muut mahdolliset muuttujat.(Paloniitty 2012, 56–57.)

Standardi SFS EN 13289 kehottaa olemaan suorittamatta mittausta, mikäli tuulen nopeus ylittää 6 metriä sekunnissa. On myös tutkimustietoa siitä, että märkä tuulensuojalevy parantaa tiiviysmittaustuloksia. Jos mahdollista, tulisi ulkokuoritus olla asennettuna ennen tiiviysmittausta (Langmans 2013, 65).

Käsiteltäessä passiivirakentamista ja passiivitalojen ilmavuotolukuja n_{50} ilmavuotoluvun muuttuminen 0,6:sta 0,5:een tai toisinpäin ei ole merkityksellistä silloin, kun ilmavuotoluvut ovat selvästi passiivitalorakentamisen määrittelemien raja-arvojen alapuolella. Passiivitalon ilmavuotoluvut ovat niin pieniä, että esim. 4 %:n virhe, kun n_{50} luku on 0,54 eli 0,5 l/h, saa n_{50} luvun nousemaan 0,56 eli 0,6 l/h. Tästä johtuen tuloksia tarkasteltaessa tulisi käyttää ehdottomasti kahden desimaalin tarkkuutta. Lopullisiin asiakirjoihin merkitään tulos yleensä yhden desimaalin tarkkuudella.

3 ILMATIIVIYDEN TOTEUTUS

3.1 Alapohjan tiivistys

Alapohjan tiivistys aloitetaan vaahdottamalla alajuoksun ja alapohjan välinen korokepalojen n. 10 mm:n rako. Kun runko on rakennettu ja jäykistävä 9 mm:n havuvanerit asennettu, vanerin ja betonin raja massataan liimamassalla. Näillä toimenpiteillä pystytään poistamaan tehokkaasti vedontunne ja ilmavuodot latti-
anrajasta.

Alapohjasta tulevat läpiviennit, varsinkin omissa suojaputkissaan tulevat sähkö- ja tietoliikennekaapelit sekä vesiputket, massataan tai vaahdotetaan tukkoon. Tätä kautta syntyy huomattavia ilmavuotoja, joita on hankala korjata jälkikäteen, jos kaapelit ja suojaputket on asennettu seinien sisään. Viemäri- ja radonputkien juuret ovat ilmavuototiiviitä radonkaistan asennuksen vuoksi, mutta tiiviiden varmistamiseksi nekin massataan tarkoitukseen soveltuvalla liimamassalla.

Kun höyrynsulkumuovi on asennettu seinille, sitä tulisi kääntää noin 300 mm lattialle. Tämä lieve jätetään pintavalun alle, jolloin höyrynsulku jatkuu yhtenäisenä seinältä lattialle. Tämä estää ilmavuodot lattian ja seinän rajasta. Haitallisen kosteuden ja kylmien ilmavirtojen sisäänpääsy ja mahdollinen kosteusvaurioiden synty on estetty tuulensuojalevyn ja sokkelin rajaan asennetulla bitumikaistalla (kuva 4).

Lämmöneristeen lisäys vähentää puolestaan lämmön siirtymistä seinärakenteen läpi, jolloin lämpötila laskee rakenteen ulko-osassa ja suhteellinen kosteus nousee. Myös tämä asia lisää homeen kasvua ja kosteuden kondensoitumista rakenteen ulko-osassa. (Lahdensivu ym. 2012, 11.)



Kuva 4. Bitumikaista asennettu sokkelin ja tuulensuojalevyn rajaan.

3.2 Seinärakenteen tiivistys

Rungon jäykistävä havuvaneri on asennettu rakennuksen ulkovaipan sisäpintaan, jolloin höyrynsulkumuovi asennetaan havuvanerin päälle siten, että se kulkee alhaalta ylös katkeamatta välipohjan kohdalla. Höyrynsulkumuovit limitetään vaakasuunnassa vähintään 300 mm päällekkäin. Höyrynsulkumuoviin ei saa tehdä jatkoksia nurkkiin, vaan jatkokset tulisi tehdä keskelle seinää (kuva 5).



Kuva 5. Hörynsulkumuovi asennettuna runkoon.

Hörynsulkumuovi kiinnitetään niittaamalla niin harvaan kuin mahdollista. Hörynsulkumuovin ja niittien rajat teipataan hörynsulkuteipillä. Nurkat kiristetään puilla ja mahdolliset reiät teipataan ja massataan huolellisesti (kuva 6).



Kuva 6. Hörynsulun kiristys nurkassa.

Kun välipohjan kehäpalkit asennetaan ja ruuvataan hörynsulkumuovista läpi, varmistetaan liitos laittamalla hörynsulkumassaa ruuvien reikään.

Kun hörynsulku on kantavan sisärungon ja havuvanerin välissä, tulee huolehtia siitä, että hörynsulun pintaan ei pääse tiivistymään kosteutta rakentamisen

aikana. Rakennusaikana on huolehdittava riittävästä lämmityksestä ja tuuleutuksesta. Rakenteen käytönaikainen toiminta edellyttää, että 75 % lämmöneristyskerroksesta on höyrynsulun ulkopuolella (Lahdensivu ym. 2012, 31.)

3.2.1 Ikkuna- ja oviaukot

Ikkuna- ja oviaukoissa höyrynsulkumuovi taitetaan aukkoihin siten, ettei nurkkiin jää vuotavia repeämiä tai liitoksia. Nurkat vahvistetaan tarkoitukseen sopivilla kulmavahvikepaloilla. Liitokset teipataan ja höyrynsulkumuovin ja runkopuun väliin asennetaan höyrynsulkumassa yhtenäisenä palkona (kuvat 7 ja 8). Höyrynsulkumuovi leikataan siten, että leikkausraja jää karmin keskikohtaan. Passiivitalossa karmi vaahdotetaan uretaanivaahdolla koko karmin leveydeltä. Uretaanivaahdotus puristaa höyrynsulkumuovin tiiviisti runkopuuta vasten, ja liitoksesta saadaan täysin ilmanpitävä. Ulkorungon leveydestä (225 mm) johtuen vaahdotus tulee suorittaa sekä karmin sisä- ja ulkopuolelta. Kun ikkunat ja ovet on asennettu ja vaahdotus suoritettu, karmin ja runkopuun väli kitataan sisäpuolelta liimamassalla (kuva 9).



Kuva 7. Höyrynsulkumassa.



Kuva 8. Kulmavahvikepala.



Kuva 9. Karmin tiivistys höyrynsulkuun.

3.2.2 Läpiviennit rungossa

Höyrynsulkumuovin puhkaisevat läpiviennit ovat hyvin kriittisiä paikkoja, koska niiden kautta runkoon saattaa muodostua haitallisia ilmapuotoja. Sähköläpivientien yhteydessä käytetään läpivientitiivisteitä. Sähköputki työnnetään varovasti höyrynsulkumuovista läpi. Sähköputken ja höyrynsulkumuovin juureen laitetaan höyrynsulkumassaa, ja tämän jälkeen läpivientitiiviste asennetaan liitoskohtaan tiukasti. Läpivientitiivisteinä käytetään itseliimautuvaa mallia (kuva 10).



Kuva 10. Itseliimautuva läpivientitiiviste.

Ilmastointikanavien läpivientikohdat rungossa kannattaa ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Läpivientikohta tulee sijoittaa rakenteeseen siten, että runkopuut eivät ole liian lähellä runkopuita. Näin putken ympärille saadaan lai-

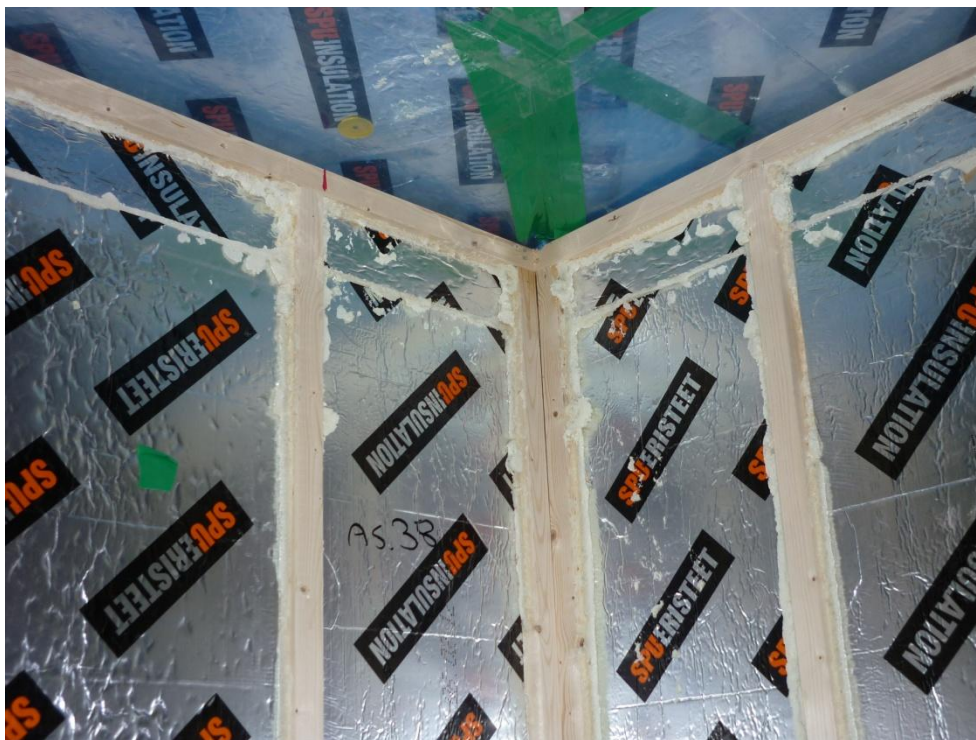
tettua riittävän tiivis läpivientilaippa (kuva 11). Läpivientilaippa kiristetään ilmastointiputken ympärille ja laipan kaulus massataan höyrynsulkumassalla höyrynsulkumuoviin. 100 mm:n erillisen kantavan sisärungon etuna on, että sähkörasioita ei tarvitse asentaa rungon höyrynsulkuun. Runko on kiinnitetty ainoastaan alhaalta alapohjaan, ja yläpuu on ruuvattu runkoon rungon pystykoolauksen kohdalta (kuva 8).



Kuva 11. Läpivientilaippa.

3.2.3 Märkätilarakenne

Märkätiloissa ulkoseinällä villa on korvattu 70 mm paksulla SPU AL– polyuretaanilevyllä. Tällä on haluttu varmistaa, että 100 mm:n sisärunkoon jää 30 mm:n tuuletusrako (liite 3). Rakenteessa on kolme tiivistä pintaa: höyrynsulkumuovi, polyuretaanilevyn alumiinipinta ja vedeneriste. Siveltävä vedeneriste päästää aina jonkin verran vesihöyryä lävitseen, samoin erikoiskova kipsilevy. Rakenteen polyuretaanilevyt on asennettava erityisen tarkasti, ja uretaanivaahdotuksessa ei saa olla reikiä, ettei mahdollinen sisäilman kosteus (kosteuden konvektio) pääse seinärakenteeseen (kuva 12). Vaahdotus tulee suorittaa siten, että uretaanivaahdotusta ei tarvitse leikata, jolloin se pitää ilmatiiviytensä.



Kuva 12. Märkätilan SPU AL -seinärakenne vaahdotettuna.

3.2.4 Asuntojen väliset seinät

Koska höyrynsulkumuovi on asennettu rakennuksen ulkovaipan sisäpintaan, ei asuntojen välisissä palo-osastoivissa seinissä ole erillistä ilmansulkua. Ulkoseinän ja palo-osastoivan seinän välinen pystynurkka kitataan paloakryyllillä. Samoin palokatossa olevat pistorasiat tulee kitata tarkasti, koska rasioiden kautta tapahtuu ilmavuotoja asunnosta toiseen. Tämä huomattiin tiiviysmittauksissa mitattaessa kahta eri asuntoa kahdella laitteistolla. Tuloksen n_{50} ero voi olla jopa 0,2 1/h. (Tiiviysmittausraportti Vaso/Soininen. 2012.)

3.3 Yläpohjan tiivistys

Yläpohjan tiivistys on erityisen tärkeää savupiippuvaikutuksen aiheuttamasta paine-erosta johtuen. Tämä ilmiö aiheuttaa tilanteen, jossa kylmä ulkoilma virtaa talon alaosaan sisään ja lämmin sisäilma pyrkii virtaamaan ulos rakennuksen yläpohjasta. Tämä ilmiö korostuu, kun sisä- ja ulkolämpötilojen ero on suuri,

eli lähinnä talvella. Jos lämmintä sisäilmaa kulkeutuu rakenteisiin ja kosteus pääsee kondensoitumaan rakenteisiin, on se aina kosteus- ja homeeriski. Ilma-
vuodon mukana kulkeutuu aina myös vesihöyryä. Ennen yläpohjan eristeiden
asennusta lämmitystä käytettäessä tulee välttää korkeita lämpötiloja, ettei vesi-
höyryä pääse tiivistymään höyrynsulkumuovin ja rakenteen väliin (kuva 13).



Kuva 13. Vesihöyry tiivistynyt rakenteeseen.

3.3.1 Polyuretaanilevyn asennus

Polyuretaanilevy asennetaan kattoon käyttämällä täysiä levyjä siten, että levy-
tyksessä pontit ovat ehjät ja kohdakkain. Pontit vaahdotetaan ja levyt naulataan
tai ruuvataan kattotuoleihin kiinni (kuva 14). Naularivit teipataan huolellisesti.

Rungossa oleva höyrynsulkumuovi teipataan kiinni höyrynsulkuteipillä tiukasti
polyuretaanilevyyn (kuva 15). Polyuretaanilevyn pinnan tulee olla kuiva ja pöly-
tön, jotta teippi ottaa kunnolla kiinni polyuretaanilevyn pintaan. Saumaan kanat-
taa laittaa kaksi teippiä limittäin.



Kuva 14. Polyuretaanilevyn asennus.

3.3.2 Yläpohjan läpiviennit

Läpivienneille käytetään kiinteitä kauluksia, mikäli mahdollista. Kaikki yläpuoliset läpiviennit massataan höyrynsulkumassalla (kuva 16). Viemäri- ja radonputket tiivistetään polyuretaanilevyyn itseliimautuvilla läpivientitiivisteillä. Aurinkokennien putket tiivistetään höyrynsulkumassalla. Rakennettaessa huomattiin, että myös pehmeille putkille olisi hyvä olla kiinteitä kauluksia.



Kuva 15. Höyrynsulkumuovin teippaus.



Kuva 16. Asennettu ja massattu ilmastointiputki.

3.3.3 Yläpohjan yläpuoliset tiivistykset

Ennen yläpohjan eristeen asennusta sekä rakentamisaikaisia tiiviysmittausta tulee suorittaa läpivientien, seinän ja katon rajakohdan tiivistykset. Tiivistäminen tapahtuu uretaanivaahdolla. Tällä toimenpiteellä varmistetaan, että kosteuden konvektiota ei pääse syntymään. Ureetaanivaahdotus poistaa myös höyrynsulkumuovin teippausseumaan kohdistuvaa rasitusta alipaineessa. Katon ja rungon yläjuoksun tiivistäminen on tärkeää, koska polyuretaanilevy ei välttämättä ole täysin kiinni rungossa (kuva 17). Putkiläpiviennit tiivistetään myös huolellisesti (kuvat 18 ja 19).

Tiiviiden rakentamisessa tulee käyttää ainoastaan tähän käyttöön soveltuvia höyrynsulkumassoja ja höyrynsulkuteippejä. Tuotteiden tulee kestää rakenteiden lämpöliikkeitä repeytymättä. Käyttölämpötiloja ja käyttöohjeita tulee noudattaa tarkoin (liitteet 4 ja 5).



Kuva 17. Polyuretaanilevyn ja rungon yläjuoksun vaahdotus.



Kuva 18. Tiivistysvaahdotus



Kuva 19. Tiivistysvaahdotus.

4 LAADUNVALVONTA

4.1 Suunnittelu ja työtapa

Passiivitaloissa energiankäytön tavoitteet ovat hyvin tiukat. Suunnittelussa tulee sitoutua tiukkoihin reunaehtoihin jo hankesuunnitteluvaiheessa. Eri suunnittelu-alojen yhteistyö on tärkeää. Arkkitehti-, rakenne- ja LVIS-suunnittelijoiden yhteistyö on entistäkin tärkeämpää passiivitalojen tuotteistamisessa. Erityisesti talotekniikkalaitteiden tuotekehityksen suuntaamisessa passiivitalojen vaatimusten ja toimintaedellytysten tiedostaminen on tärkeää. (Kouhia ym. 2013, 58.)

Suunnittelussa tulee ottaa huomioon myös aikataulutus. Tiiviyn rakentamiselle, tarkastuksille, vuotojen etsimiselle ja rakentamisen aikaiselle tiiviysmittaukselle tulee sijoittaa oma ajankohta sisävalmistuksen tehtäväsuunnitelmassa ja viikkosuunnittelussa.

Tiiviyn rakentamisen alkutilanteessa kaikki LVIS-läpiviennit on asennettu. Ikkunat ja ovet on asennettu. Rungon höyrynsulku ja sisäpuolinen runko on asennettu. Kattoristikot ja ruoteet on asennettu, samoin rungon eristeet. Lopputilanteessa dokumentit eli valokuvat, rakentajien omavalvontalomakkeet ja työnjohtajan tarkastuslomakkeet on liitetty laatukansioon. Rakentamisen aikainen tiiviysmittaus on suoritettu ja mahdolliset ongelmat korjattu. Sisävalmistustöiden jatkamiselle ja yläpohjan puhallusvillan asennukselle on annettu lupa.

Kustannussuunnittelussa passiivirakentamisen erityispiirteet täytyy ottaa huomioon. Passiivitalon rakentamiskustannukset ovat noin 5 % suuremmat kuin normaalissa rakentamisessa (Airaksinen, 2006). Tosin tämän kaltaisessa pilottihankkeessa kuin Vaso-Soininen kustannukset ovat olleet vieläkin suuremmat verrattuna normaalirakentamiseen.

Työtavat ja koulutus sovitaan aloituspalaverissa. Etukäteen kartoitetaan tekijöiden ja työnjohdon motivaatio. Kohteen laadunvalvontaa helpottaa huomattavasti se, että tekijät ovat koko tiiviysrakentamisen ajan sama työryhmä. Aloituspalaverissa sovitaan työryhmän koko. Tässä tapauksessa päädyttiin kahteen ryhmään. Molempien ryhmien koko oli 1+1. Toinen työryhmä suorittaa havuvanerijäykistyksen, välipohjan asennuksen ja höyrynsulkukalvon asennuksen sekä yläpohjan polyuretaanilevyn asennuksen. Toinen työryhmä suorittaa yläpohjan ja seinän höyrynsulun teippaukset, läpivientien tiivistykset, yläpohjan yläpuoliset tiivistykset, mahdollisten vuotojen etsinnän sekä asuntojen valmistelun tiiviysmittaukseen. Lisäksi ikkunoiden ja ovien uretaani-vaahdotuksen sekä palokatkojen kittauksen suorittaa ammattikittari.

Aloituspalaverissa tarkistetaan ja mietitään tarvittavat tarvikkeet, työkalut ja erikoisvälineet, kuten esim. merkkisavut ja alipaineistajat. Samoin työturvallisuusasiat käydään läpi sekä mahdollisesti käytettävät telineet. Koska tarkoituksena on tehdä koko kohteen 38 asunnon tiiviysrakentaminen samoilla työryhmillä, osallistuu työnjohto myös mallityön toteutukseen. Samalla pystytään laatimaan työmenekki tth per asunto. Laatuksiteriksi sovitaan, että rakentamisen aikaisen tiiviysmittauksen tulos tulee olla sekä ali- ja ylipaineella $n_{50} \leq 0,6 \text{ l/h}$.

4.2 Rakennusvaiheen tarkastukset ja tarkastuslistat

Rakentamisen aikaiset tarkastukset voidaan jakaa kahteen ryhmään: rakennusvaiheen tarkastukset ja huoneistokohtaiset tarkastukset. Rakennusvaiheessa tarkastuksen suorittaa työnjohtaja. Rakennusvaiheesta otetaan valokuvat. Työnjohtaja täyttää tarkastuslistaa sitä mukaa, kun työ etenee.

Alapohjassa tarkastetaan alajuoksun uretaanivaahdotukset, läpivientien kittaukset, havuvanerin ja alapohjavalun kittaus sekä ennen pintavalua höyrynsulun kääntö pintavalun alle.

Runkotyön osalta tarkastetaan höyrynsulkukalvon limitykset, teippaukset, aukkokohtaisissa höyrynsulkukalvon oikea leikkaaminen sekä läpivientien asennukset. Ikkunoiden ja ovien uretaanivaahdotukset ja sisäpuolen karmien ja rungon väliset kittaukset tarkastetaan.

Yläpohjan tarkastukset suoritetaan huoneistokohtaisesti. Varsinkin yläpohjan yläpuolisiin tiivistyksiin uretaanivaahdolla tulee kiinnittää erityistä huomiota. Kaikista rakennusvaiheista otetaan valokuvia, varsinkin jos työvaihe on ollut haasteellinen (kuva 20).



Kuva 20. Eri tasossa olevien asuntojen välisen seinän yläliitos.

Huoneistokohtainen laadunvalvonta perustuu työryhmän omavalvontaan. Omavalvonnan kautta työryhmän motivaatio pysyy korkealla, koska tekijät joutuvat itse ottamaan vastuun siitä, että kaikki työvaiheet tulee tehtyä. Omavalvonta suoritetaan tarkastuslistalla, joka täytetään jokaisesta asunnosta erikseen. Tekijät merkitsevät tarkastuslistaan jokaisen työvaiheen suorituspäivämäärän ja kuittaavat sen suoritetuksi. (Liite 6.) Tarkastuslista on jaettu kahteen eri osaan: työvaihetta seuraavaan ja tiiviyskoetta valmistelevaan.

Työnjohtajalla on myös asuntokohtainen tarkastuslista (liite 7), joka on yksityiskohtaisempi. Tarkastuksien yhteydessä ja dokumentoinnin

varmistuksena valokuvaus on ehdottoman tärkeää. Valokuvauksen merkitystä ei tule väheksyä. Valokuvilla pystytään osoittamaan, että työvaihe on tehty ja tarkastettu. Asuntojen tarkastuslistat liitetään osaksi laatukansiota. Valokuvat tallennetaan mahdollista myöhempää tarkastelua varten.

Sisälämpötilojen ja ilmakehän kosteuden seuranta kuuluu olennaisena osana Hartela Oy:n laadunvalvontaan. Kosteutta tulee seurata, jotta vältetään vesihöyryn tiivistymiseltä höyrynsulkumuovin ja sisärungon eristeen väliin. Sisälämpötila- ja kosteusseurantalistat liitetään laatukansioon.

4.3 Ilmavuotojen paikannus ja toimenpiteet ennen tiiviysmittausta

Mittaajan ongelmana on usein se, kuinka suuri alipaine tarvitaan, että vuodot voidaan havaita. Suurella alipaineella saadaan pienetkin ilmavuodot havaittua. Riskinä voi olla teippausten pettäminen. Vuotojen paikannuksen periaate on luoda huoneistoon 10–90 Pa:n alipaine. Alipainetta tulee olla vähintään 10 Pa, jolloin savupiippuvaikutuksen aiheuttama ylipaine saadaan kumottua. Ulkoilma ja maan huokosilma pyrkivät vuotopaikoista sisään, jolloin vuotopaikat voidaan paikantaa. (Paloniitty 2012, 58.)

Ilmavuotojen paikannus tapahtui matalatehoista alipaineistajaa, merkkisavua ja aisteja käyttämällä. Ulko-oveen asennettiin polyuretaanilevy tiiviisti ja polyuretaanilevyyn alipaineistaja. Tutkittavaan asuntoon saatiin tällä tavalla luotua lievä alipaine. Työryhmä tutki ikkunoiden ja ovien tiivisteet, seinän ja yläpohjan liitoskohdat, nurkat, pistorasiat, kittaukset ja läpivientien juuret merkkisavulla ja tuntoaistia käyttäen. Mahdolliset vuotokohdat löytyivät suhteellisen helposti, ja korjaustoimenpiteet oli helppo tehdä, koska ulkoseinät ja katto olivat vielä ilman levytystä. Tämä säästi kustannuksia ja aikaa. Täytyy muistaa, että suurin osa tiiviiden rakentamisesta jää pintarakenteiden ja eristeiden alle piiloon. Rakentamisen jälkeen tehtävät vuotojen paikannukset, purku- ja korjaustyöt ovat erittäin aikaa vieviä ja kalliita toimenpiteitä. Tyypillisimpiä vuotokohtia olivat seuraavat: polyuretaanilevyn ja höyrynsulkumuovin huolimaton teippaus,

ulkoseinässä ja yläpohjassa olevien läpivientien huolimaton massaus, ikkunoiden rutussa olleet tiivisteet sekä katon nurkkien huolimaton massaus ja teippaus.

Ennen varsinaista rakentamisen aikaista tiiviysmittausta mitattava asunto valmisteltiin mittausta varten. Huoneisto rauhoitettiin kokonaan kaikelta työskentelyltä. Mitattavien asuntojen ovet laputettiin tiedoksiannolla mittauksesta jo vuorokautta aikaisemmin. Tiiviyskoetta varten kaikki ikkunoiden lukitukset tarkistettiin. Viemäri- ja ilmastointiputket tukittiin tulppaamalla tai teippaamalla. Samoin ulkoilmaan tai alapohjan alle menevät sähköputket teipattiin tukkoon. Tämän jälkeen hajulukollisiin lattiakaivoihin kaadettiin vettä. Tyypillinen mittauksen epäonnistuminen johtui huolimattomista viemäreiden tulppauksista. Passiivirakenteisessa asunnossa yhden 110 mm Ø viemäriputken tulppaamisen unohtaminen näkyy tiiviysmittaustuloksessa jopa 0,5–0,8 1/h virheenä. Kun koko rakennuksen ulkovaipan sisäpinta on saatettu ilmatiiviiksi, voidaan seuraavaksi suorittaa tiiviysmittaus.

4.4 Tiiviysmittaus osana laadunvalvontaa

Rakennuttajan kanssa on sovittu laatukriteereistä ennen rakentamisen aloitusta.

”Rivitalojen tiiviys on saatu selville mittaamalla yksittäisten huoneistojen tiiviys samoin menetelmin kuin pientaloissakin ja laskettu tuloksista keskiarvo, joka on rakennusten ilmavuotoluku. Mitattavia asuntoja tulee olla vähintään 20 prosenttia koko rivitaloyhtiön asuntomäärästä, lisäksi jokaisesta erillisestä rakennuksesta tulee mitata vähintään yksi asunto. Tämä ehto toteutuu, kun 38 asunnosta on mitattu 13 kpl eli 33 %.” (V. Vairinen, henkilökohtainen tiedonanto. 26.3.2013)

Rakentamisen aikainen tiiviysmittaus antaa paljon tietoa rakentamisen laadusta, jolloin voidaan kohdistaa ja tarkentaa rakentamisessa olevia ongelmakohtia.

Tiiviysmittauksissa löytyi selviä ongelmakohtia, joita olisi ollut todella hankala korjata lopullisen tiiviysmittauksen jälkeen. Esimerkkinä mainittakoon asuntojen välisten palo-osastoivien seinien pistorasioiden vuodot. Vuotokohdat havaittiin tehtäessä Turun ammattikorkeakoulun kanssa mittausta kahdella tiiviysmittaus-

laitteistolla. Mittaus tehtiin kahteen kertaan. Ensimmäisellä kerralla mittaus suoritettiin yhdellä laitteistolla. Ilmavuotoluku $n_{50} \leq 0,6$ 1/h ylittyi selvästi. Seuraavassa mittauksessa paritalon toinen asunto ajettiin samaan aikaan käsikäyttöisesti siten, että molemmissa asunnoissa vallitsi sama paine. (Kuva 21.) Mittaustulos parani 0,2 1/h. Asuntojen välisessä seinässä oleva vuoto on vain haitta huoneistoittain mitattaessa, eli se ei vaikuta koko rakennuksen ulkovaipan toimivuuteen eikä tiiviYTEEN. Muita tyypillisiä vuotokohtia olivat ylipaineessa terassien ovet. Nämä vuodot johtivat ovien säätötoimenpiteisiin. Samoin pistorasioiden kittaushalokatkot paransi mittaustuloksia.



Kuva 21. Mittauslaitteistot vierekkäisissä asunnoissa.

Ajankohta, jolloin mittaus tehdään, on harkittava tarkoin. Koko rakennuksen ulkovaipan sisäpinta täytyy olla tiivistetty. Seinäeristeet, ulkovuoraus (mikäli mahdollista), ikkunat, ovet ja asuntojen väliset seinät täytyy olla asennettu. Samoin kaikki ulos tai alapohjan alle menevät läpiviennit tulee olla asennettu. Väliseinät, sisärungon ja katon levytykset sitä vastoin haittaavat vuotojen etsintää ja ilmatiiyvyyden toteutuksen tarkastuksia. Jotta tästä "ylimääräisestä" työvaiheesta ei tulisi ongelmia aliurakoitsijoiden kanssa, tulisi tiiveyden rakentaminen ja tiiviydsmittaukset ottaa mukaan aikatauluihin. Tällä toimenpiteellä välttäisiin päällekkäisyyksiltä ja turhilta mutinoilta.

5 TIIVIYSMITTAUSTULOSTEN TARKASTELU

5.1 Mittaustulosten arviointi

Arvioitaessa rakentamisen aikaisia ja valmiiden asuntojen tiiviysmittaustuloksia tulosten paraneminen rakentamisen edetessä voidaan laittaa rakentamistavan, laadunvalvonnan ja rakentajien ammattitaidon kehityksestä johtuvaksi.

Molempien tiiviysmittausten keskiarvot ovat samat $n_{50} = 0,5$ 1/h. Samoin pienin ja suurin ilmapuotoluku on sama eli $n_{50} = 0,3$ 1/h ja $n_{50} = 0,6$ 1/h. Tulosten vaihtelu mittauskerrasta riippuen on hieman muuttunut huonompaan rakentamisen aikaisesta valmiiseen 5/13, kun taas valmiista rakentamisen aikaiseen suhde on 2/13. Muuttumattomana tulos on pysynyt 6/13 mittauksessa. Jos tarkastellaan mittaustuloksia 1. ja 2. rakennusvaiheen välillä, huomataan jonkinlainen ero mittaustuloksissa. Tulosten paranemiseen ovat vaikuttaneet toteutusmenetelmien kehittyminen ja laadunvalvonnan selkiytyminen. Ensimmäisen vaiheen talojen 1–5 asuntojen 1–19 mittauksissa on $n_{50} = 0,6$ 1/h tuloksia 8/12 mittauksesta, kun toisessa vaiheessa luovutettujen talojen 6–10 asuntojen 20–38 $n_{50} = 0,6$ 1/h tuloksia on 3/14 mittauksesta (liite 8).

Pienimmät ilmapuotoluvut $n_{50} \leq 0,6$ 1/h on saatu asunnosta 11 ja koko talon 9 mittauksesta. Asunnon 11 tulosta $n_{50} = 0,33$ 1/h voidaan pitää erinomaisena, koska asunnon tilavuus on hyvin pieni. Huoneistoala on 53 m², vaipan pinta-ala on 183 m² ja kokonaiskuutiomäärä on 141 m³. Tämä valmiin asunnon mittaustulos saatiin paranemaan huomattavasti, kun rakentamisen aikaisessa mittauksessa asuntojen 11 ja 16 välisestä hormista paikallistettiin vuoto, joka korjattiin. Tämän hormivuodon löytymisen jälkeen kaikkien hormien palokittaukset ja palokatkojen valut pystyttiin tarkistamaan ja korjaamaan.

Koko rakennuksen 9 mittaustulokseksi saatiin $n_{50} = 0,29$ 1/h. Mittaus toteutettiin siten, että rakennuksen asuntojen väliset seinät olivat osittain auki. Mittauksen tarkoituksena oli tarkistaa koko rakennuksen vaipan ilmanpitävyys. Tällä mittauksella todettiin, että koko rakennuksen vaipan yhtenäinen höyrynsulku-muovin asennus ilman minkäänlaista osastointia on oikea ja hyväksi todettu rakennustapa. Näin saatiin vertailuarvo koko rakennuksen ja huoneistokohtaisen tiiviysmittaamisen välille.

5.2 Mittaustulosten vertailu

Rakennusvaiheenaikaisten tiiviysmittausten keskiarvo on $n_{50} = 0,5$ 1/h. Korkein sisälämpötila on $+16$ °C ja matalin lämpötila $+4$ °C. Sisälämpötilojen keskiarvo on $+11,35$ °C. Ulkolämpötilojen vaihteluväli on $+15$ °C:n ja -11 °C:n välillä. Ulkolämpötilojen keskiarvo on $+6,28$ °C. Ilmanpaineiden vaihteluväli on $1\,018,7$ hpa:n ja $996,4$ hpa:n välillä. Ilmanpaineiden keskiarvoksi saadaan $1\,011,6$ hpa. Tuulilukemat vaihtelevat välillä 1–5 ja keskiarvoksi saadaan 1,85. Tuulen nopeus on luokiteltu asteikolla 1–7.

Valmiiden asuntojen tiiviysmittausten keskiarvo on $n_{50} = 0,5$ 1/h. Korkein sisälämpötila on $+21$ °C ja matalin lämpötila $+12$ °C. Sisälämpötilojen keskiarvo on $+15,6$ °C. Ulkolämpötilojen vaihteluväli on 0 °C:n ja -9 °C:n välillä. Ulkolämpötilojen keskiarvo on $-4,7$ °C. Ilmanpaineiden vaihteluväli on $1\,028,2$ hpa ja $1\,008,1$ hpa välillä. Ilmanpaineiden keskiarvoksi saadaan $1\,018,8$ hpa. Tuulilukemat vaihtelevat välillä 1–4 ja keskiarvoksi saadaan 2. (Liite 8.)

5.3 Lämpötilaerot ja ilmanpaine

Kun otetaan huomioon sisä- ja ulkolämpötilojen väliset erot, mittaustuloksissa ei voida huomata juurikaan eroja. Samoin ilmanpaineen sekä tuuliolosuhteiden vaikutusta ei voida pitää mainittavana muuttujana mittaustuloksissa.

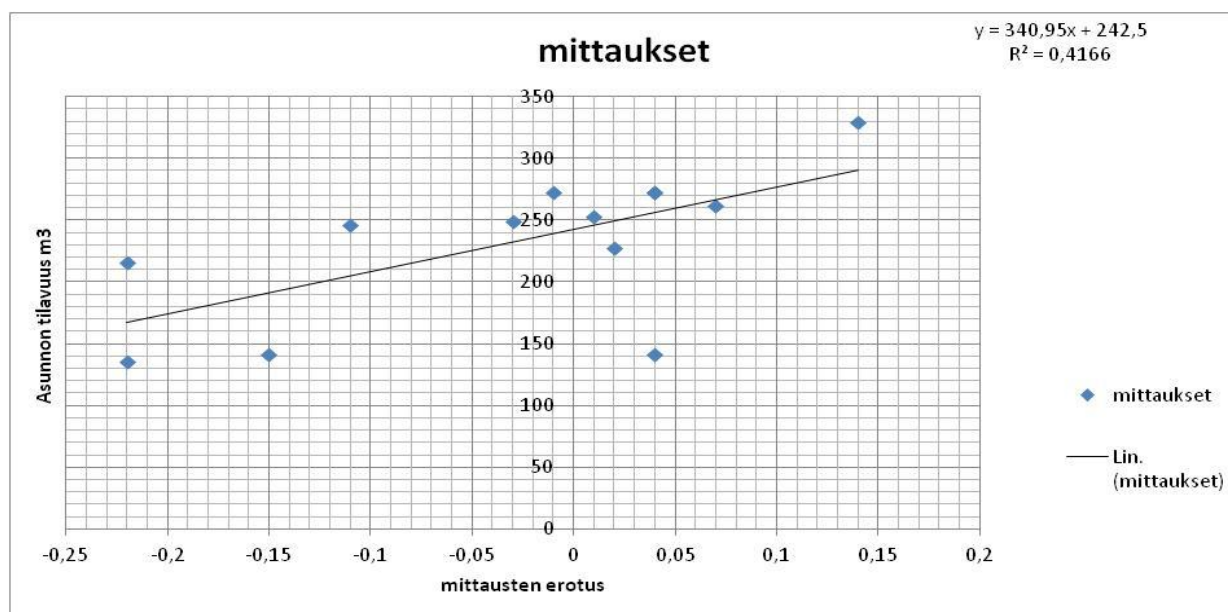
5.4 Lineaarinen riippuvuus

Syitä mittaustulosten eroavaisuuteen pyritään selvittämään lineaarisella regressiomallilla, jossa vertaillaan eri muuttujien vaikutusta tuloksiin. Muuttujina käytetään lämpötilaeroja, rakennusvaiheen ja valmiin asunnon tiiviysmittauksen tuloksia, mittaustulosten erotuksia ja asuntojen tilavuuksia. Riippuvuuden arvioinnissa määräytynyt selitysaste R^2 on 0,0182. Kun R^2 :sta otetaan neliöjuuri, saadaan korrelaatiokerroin, joka on 0,13. Mitä lähempänä korrelaatiokerroin on 1:tä, sitä vakuuttavampi on yhteys muuttujien välillä. Kuvassa regressiosuoran kerroin (kulmakerroin) kertoo, kuinka suuri sen vaikutus on tulokseen. Loiva kulmakerroin kertoo lämpötilaerojen vaikutuksen olevan vähäinen. Kun vertaillaan lämpötilojen erotuksia ja muuttujan suhdetta rakentamisen aikaisen ja valmiin asunnon n50 tiiviysmittaustulosten eroihin, Y-akseli kuvaa rakentamisen aikaisen ja valmiin asunnon lämpötilan erotusta ja X-akseli kuvaa rakentamisen aikaisen ja valmiin asunnon tiiviysmittausten erotusta. Kyseisten muuttujien muodostama lineaarinen regressiosuora lämpötilaerotuksen ja tiiviysmittausten erotuksen välillä on 13 %. Lämpötilaeroja ei siis voida pitää selittävänä muuttujana. (Taanila, 2010.)

5.4.1 Tiiviysmittausten erotus ja asunnon tilavuus.

Taulukko 1. Mittaustulosten erotus ja asunnon tilavuus.

Rakennus	Valmis	Ero	Tilavuus m ³
0,43	0,57	0,14	330
0,63	0,62	-0,01	273
0,6	0,62	0,02	228
0,54	0,6	0,04	142
0,55	0,33	-0,22	136
0,64	0,49	-0,15	142
0,61	0,58	-0,03	249
0,53	0,57	0,04	273
0,35	0,39	0,04	273
0,47	0,48	0,01	253
0,6	0,38	-0,22	216
0,44	0,51	0,07	262
0,53	0,44	-0,11	246



Selitysaste $R^2 = 0,4166$. Korrelaatiokerroin $\sqrt{0,4166} = 0,65$.

kuvio 1. Mittaustulosten erotuksen ja asunnon tilavuuden vertailu.

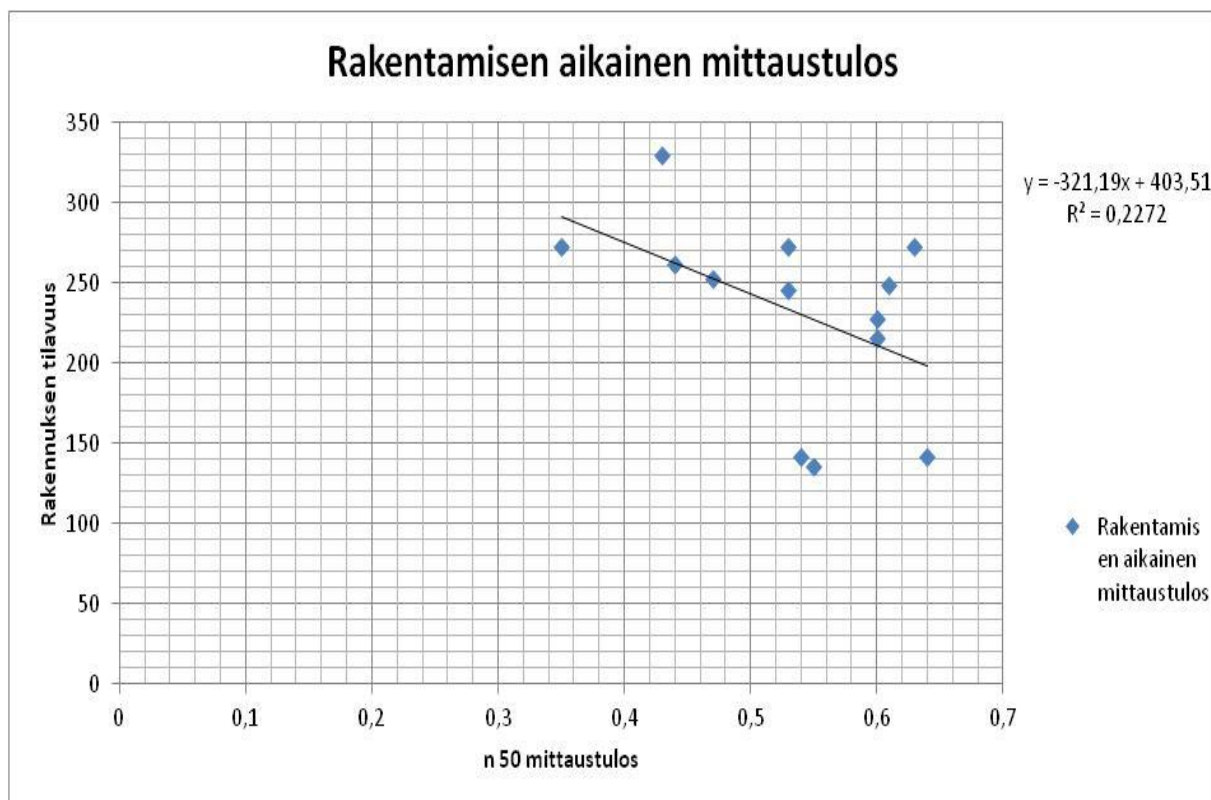
Y-akseli kuvaa rakennuksen tilavuutta m³, ja X-akseli kuvaa tiiviysmittaustulosten erotusta. Kun erotus on miinusmerkkinen, tulos on parantunut valmiin asunnon mittauksessa. 6/13 asunnossa tulos parani valmiin asunnon mittauksessa ja 7/13 heikkeni. (Taulukko 1.)

Asunnon tilavuuden käyttäminen muuttujana antaa jo selvän viitteen tiiviysmittaustulosten eroista (korrelaatiokerroin 0,65). Tilavuudeltaan pienemmissä asunnoissa mittaustulosten erot ovat suurempia kuin suuremmissa asunnoissa. Kuuden suurimman asunnon mittaustulosten erojen keskiarvo on 0,055 1/h. Kuuden pienimmän asunnon mittaustulosten keskiarvo on 0,12 1/h. (Kuvio 1.) Passiivirakentamisessa kyseinen ero voi aiheuttaa esim. n50 = 0,6 1/h lipsahamisen pois passiivitalon kriteereistä. 0,12 1/h poikkeama ylöspäin tarkoittaa 20 % virhettä.

5.4.2 Rakentamisen aikaisen mittaustuloksen ja asunnon tilavuuden vertailu.

Taulukko 2. Rakentamisen aikaiset n50 tiiviysmittaustulokset ja asuntojen tilavuus.

Rakennus	Valmis	Rak. N50	tilavuusm ³
0,43	0,57	0,43	330
0,63	0,62	0,63	273
0,6	0,62	0,6	228
0,54	0,6	0,54	142
0,55	0,33	0,55	136
0,64	0,49	0,64	142
0,61	0,58	0,61	249
0,53	0,57	0,53	273
0,35	0,39	0,35	273
0,47	0,48	0,47	253
0,6	0,38	0,6	216
0,44	0,51	0,44	262
0,53	0,44	0,53	246



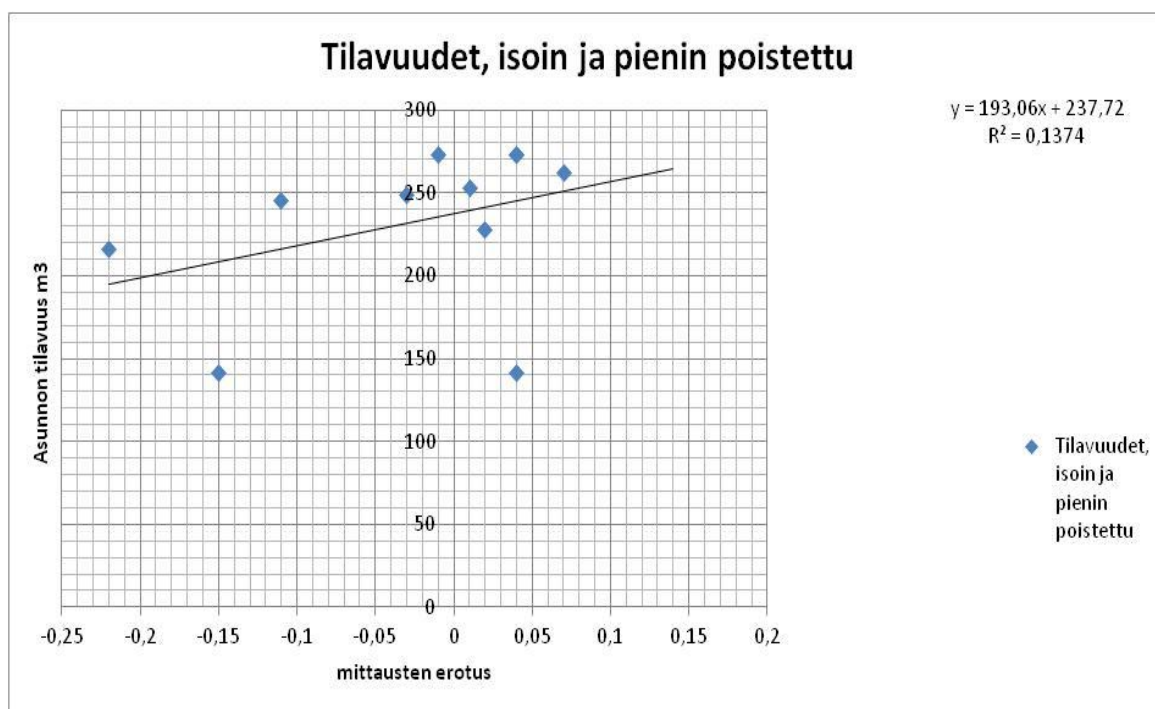
Korrelaatiokerroin $\sqrt{0,2272} = 0,48$. Selitysaste $R^2 = 0,2272$

kuvio 2. Rakentamisen aikaisen n50 mittaustuloksen ja asunnon tilavuuden vertailu.

Y-akseli kuvaa asunnon tilavuutta m³ ja X-akseli rakentamisen aikaisia n50 1/h mittaustuloksia.

Tiiviysmittaustuloksella n50 ja asunnon tilavuudella on vaikutus tiiviysmittaustulokseen. Kuuden suurimman asunnon tuloksien keskiarvo on 0,47 1/h. Kuuden pienimmän asunnon tuloksien keskiarvo on 0,59 1/h. Tämä otos tukee käsitystä, että kuutiutilavuudeltaan pienten ja tiiviiden asuntojen mittaustuloksissa on enemmän vaihtelua (kuvio 2). Kun taulukosta 3 poistetaan kuutiutilavuudeltaan suurin ja pienin asunto, selitysaste R^2 pienenee huomattavasti (0,0862). Kulmakertoimen pienenemisestä johtuen korrelaatiokerroin pienenee 0,29:ään. Nyt keskihajonta mittaussarjassa on asettunut regressiosuoran läheisyyteen (kuvio 3).

Kuvioiden 2 ja 3 antama tieto tukee rakentamisen aikaisen tiiviysmittaustuloksen ja asunnon tilavuuden syy-yhteyttä mittaustulosten eroon. Pienien asuntojen mittaustulosten erotusten keskiarvo 0,12 1/h johtuu asuntojen tiiviyydestä. Tilavuudeltaan pienten asuntojen mittausrvirheen merkitys kasvaa. Mahdollinen syy voi olla myös virtauksen kanavoituminen. (Paloniitty 2012, 56.) Kuutiotilavuudeltaan suuremmissa asunnoissa ongelmaa ei ole. Näistä syistä johtuen vuonna 2013 rakennusluvan saaneille kohteille ilmatiiviysmittauksessa käytetään ilmavuotolukua $q_{50}[\text{m}^3/(\text{h m}^2)]$. ”Ilmavuotoluvulla q_{50} kuvataan rakennusvaipan keskimääräistä vuotoilmavirtaa tunnissa 50 Pa:n paine-erolla kokonaissämittojen mukaan laskettua rakennusvaipan pinta-alaa kohden $[\text{m}^3/(\text{h m}^2)]$.” (Paloniitty 2012, 29.)



Korrelaatiokerroin $\sqrt{0,1374} = 0,19$. Selitysaste $R^2 = 0,1374$.

kuvio 3. Suurin ja pienin asunto poistettu.

6 YHTEENVETO JA POHDINTA

6.1 Tiiviiden rakentaminen

Periaatteessa passiivirakentamisen ja normaalin rakentamisen toteutus tehdään samalla tavalla. Passiivitalon haasteellisuuden luo rakenteiden ja eristeiden massiivisuus ja paksuus. Tavoiteltaessa pieniä n50 ilmavuotolukuja pienetkin vuodot vaikuttavat asumisviihtyvyyteen. Usein läpivientien tiivistykset tulevat paksujen eristekerrosten alle. Tästä johtuen vasta valmiin rakennuksen tiiviysmittauksessa huomattavat vuodot on erittäin hankalaa ja kallista korjata. Rakentamisen aikainen tiiviysmittaus on ehdottoman tärkeä ja loppupelissä kustannuksia ja aikaa säästävä toimenpide. Rakentamisen aikaisen tiiviysmittauksen ainoa tarkoitus ei ole saada hyviä mittaustuloksia, vaan löytää tietyt tyypit ja helpottaa niiden korjaamista.

Rakentamisen kannalta erilaisten läpivientikappaleiden ja tiivisteiden laatua tulisi parantaa. Esim. rungon läpivienneille täytyy olla tilaa pystyrunkopuiden läheisyydessä, jotta tarpeeksi tukevien läpivientilaippojen käyttö olisi mahdollista. Sähköputkien läpiviennit tulisi tehdä aina jäykällä sähköputkella. Jälkiasennuksia valmiiseen rakenteeseen ei saisi tehdä. Vesiputkien sijoittelua kantavaan sisärunkoon pitäisi ehdottomasti välttää. Yläpohjan läpiviennit tulisi toteuttaa kaikilta osin jäykällä läpivientikauluksilla. Pystynousuhormien täytyy olla riittävän tilavat, että putket eivät nouse liian lähekkäin toisiaan. Putkille pitää olla riittävästi tilaa asentaa läpivientitiivisteet ja höyrynsulkumassa.

6.2 Tiiviiden laadunvalvonta

Laadunvalvonnan keskeisiksi elementeiksi muodostui rakentajien omavalvonnan kehittäminen ja laadunvalvonnan kriteerien toteutuminen rakentamisen aikana. Pelkkä passiivinen rakentajien ”perään katsominen” ei riitä passiivitalora-

kentämisen vaatimustasolla. Rakentajat on saatava innostumaan rakentamisen haasteellisuudesta, ja heidän on opittava suunnitelmallinen ja itsenäinen työskentelytapa. Tässä apuvälineenä käytettiin omavalvontalistaa ja valokuvausta. Rakentajien vapaaehtoinen valinta takaa työryhmien oman halun toteuttaa korkealaatuista rakentamista. Työnjohdon ja toteuttajien vuorovaikutus ja kommunikointi on avainasemassa korkeaa laatua toteutettaessa. Ajanpuute tai työnjohdon resurssipula ei saa vaikuttaa lopputulokseen.

Myös suunnittelu poikkeaa tavanomaisesta. Talotekniikan määrä ja sitä kautta läpivientien ja hormeissa nousevien putkistojen määrä on hyvin suuri. Suunnittelussa tämä tulisi ottaa huomioon riittävänä asennustilana. Toisaalta tiiviin vaiipan saavuttamiseen parhaana toimenpiteenä olisi läpivientien minimointi. On selvää, että tulevaisuudessa rakenne- ja LVIS-suunnittelijat joutuvat tekemään entistä enemmän yhteistyötä. Suunnittelussa tulisi ottaa huomioon passiivirakentamisen erityispiirteet.

Läpivientien määrä tulisi minimoida ja järkeistää siten, että läpivientien tiivistys olisi mahdollista ilman riskejä. Ulkovaipan sisäpinnan hyvä tiiviys on saavutettavissa hyvällä rakenteiden ja liitosten suunnittelulla, ja tätä kautta tiiviyn toteutus ei vaadi liikaa improvisointia.

Aikataulutuksessa joudutaan ottamaan huomioon uusia työvaiheita. Erilaiset aikataulujen ja resurssien apuohjelmat ja kirjat tulisi saattaa nopeasti ajan tasalle. Rakennusyhtiöiden tulisi luoda omat passiivirakentamisen laatuohjeet.

Rakentamistapaohjeet, uudenlaiset valvontatavat, ohjeistus ja työntekijöiden koulutus auttavat tulevaisuudessa ylläpitämään suomalaisen passiivirakentamisen korkeaa laatua.

Koska kyseessä on uusi tapa rakentaa, laatua tulee valvoa myös rakentamisen jälkeen. Tässä apuna voidaan käyttää erilaisia mittausmenetelmiä. Soinisten passiivitalokohteeseen on yhteen taloista asennettu kahteen eri mittauspiste-

seen anturit, joilla laadunvalvontaa voidaan jatkaa rakentamisen jälkeen. Antureilla mitataan lämpötiloja ja kosteuksia viidessä eri pisteessä seinärakenteessa: tuuletusraossa mittaamassa ulkoilman olosuhteita, tuulensuojalevyn ulkopinnassa, tuulensuojalevyn sisäpinnassa, höyrynsulkumuovin sisäpuolella mineraalivillassa ja sisätilassa. Näiden antureiden avulla voidaan seurata muutoksia ja kerätä tietoa kosteuden ja lämmön siirtymisestä runkorakenteessa eri vuodenaikoina.

6.3 Rakentamisen aikainen tiiviysmittaus

Rakentamisen aikainen tiiviysmittaus antaa paljon tietoa rakentamisen laadusta, jolloin voidaan kohdistaa ja tarkentaa rakentamisessa olevia ongelmakohtia. Laatukriteeriksi sovittu rakentamisen aikainen tiiviysmittaus toteutui kohteessa erinomaisesti. Epäkohtiin ja virheisiin pystyttiin reagoimaan nopeasti. Vain kahdessa mittauksessa 27 mittauksesta virhettä jouduttiin etsimään ja korjaamaan niin paljon, että jouduttiin tekemään uusintamittaus. Kaikki epäkohdat löydettiin, ja asunnoista saatiin laatukriteerin täyttäneet tiiviysmittaustulokset.

Täytyy muistaa, että rakentamisen aikaiset mittaukset ovat osa laadunvalvontaa mutta eivät virallisia ja lopullisia mittaustuloksia, joiden perusteella voisi tehdä esim. energiatodistuksen.

Mittaukseen teknisenä tapahtumana täytyy kiinnittää huomiota, ettei olosuhteista, rakentamisvaiheesta ja suureiden laskemisesta johtuvista seikoista muodostuisi mainittavaa virhettä mittaustuloksiin.

Rakennusten ilmatiiviyden mittaus on suoritettu mitatussa kohteessa kahteen kertaan, kun rakennuksen vaipasta on saatu ilmanpitävä sekä rakennuksen valmistumisen yhteydessä. Kun mitattava kohde on suunniteltu passiivitalokriteerit täyttäväksi, kriteerin mukainen tiiveys $n_{50} \leq 0,6$ 1/h on varmistettava mit-

taamalla. Kohteen mitattu ilmavuotoluku n_{50} on 0,5 1/h, jolloin voidaan todeta, että ilmatiiviyden osalta passiivitalon kriteerit täyttyvät.

LÄHTEET

Airaksinen, M. 2006. Mitä energiatehokkuus maksaa? Espoo: VTT.

Kouhia, J.; Nieminen, J. & Holopainen, R. 2013. Paroc– passiivitalo ,kylmän ilmaston energia-
ratkaisu. Espoo: VTT.

Krankka, J. 2013. Uuudet energiatehokkuuden vaatimukset: RATEKO.

Lahdensivu, J.; Suonketo, J.; Vinha, J.; Lindberg, R.; Manelius, E.; Kuhno, V.; Saastamoinen, K.; Salminen, K & Lähdesmäki, K. 2012. Matalaenergia- ja passiivitalojen rakenteiden ja liitosten suunnittelu- ja toteutusohjeita. Tampereen teknillinen yliopisto: Rakennustekniikanlaitos, Rakennetekniikka, tutkimusraportti 160.

Langmans, J. 2013. Feasibility of exterior air barriers in timber frame construction. Leuven, Science, Engineering & Technology v.u. Leen Cuypers, Arenberg Doctoraatsschool, W. de Croylaan 6, 3001 Heverleen.

Paloniitty, S. 2012. Rakennusten tiiviysmittaus. Helsinki: Suomen rakennusmedia.

Peltola, N. & Loisa, L. 2013. Energiaselvitys Vaso/Soininen. Granlund Oy.

Suomen rakennusmääräyskokoelma D3, 2012. Rakennusten energiatehokkuus. Helsinki: Ympäristöministeriö.

Suomen rakennusmääräyskokoelma D5, 2007. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehon tarpeen laskenta. Helsinki: Ympäristöministeriö.

Taanila, A. 2010. Lineaariset regressiomallit. Helsinki: Haaga/Helia.

Tuomisto, J. 2011. Rakennusten ilmatiiviys. Seinäjoen ammattikorkeakoulu.

.Vinha, J; Laukkarinen, A. ; Mäkitalo, M.; Nurmi, S.; Huttunen, P.; Pakkanen, T.; Kero, P.; Manelius, E.; Lahdensivu, J.; Köliö, A.; Lähdesmäki, K.; Piironen, J.; Kuhno, V.; Pirinen, M.; Aaltonen, A.; Suonketo, J.; Jokisalo, J.; Teriö, O.; Koskenvesa, A & Palolahti, T. 2013. Ilmastomuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset ,vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tampereen teknillinen yliopisto: Rakennustekniikanlaitos, tutkimusraportti 159.

www.paroc.fi/knowhow/energiatehokkuus/rakennusten-suunnittelu/rakennuksen-vaippa

Viitattu 30.9.2013 www.rakli.fi/linkit/kehitysjaoprojektit/projektit/hankintaklinikka/vaso-soininen/

Tiiviysmittausraportti Vaso/ Soininen 2012. Turun AMK.

Liite 1. Granlund Oy energiaselvitys s. 7

ENERGIASELVITYS

Laat./Hyv.:
NKP/LLo
Laadittu:
19.4.2013
Viim. päivitys:



7 (9)

Taulukko 3. Asuinrakennuksien lämmitysenergian ja muun energiankulutuksen kokonaistarpeet.

Talo	lämmityssähköenergian ostotarve kWh/a	muun sähköenergian ostotarve kWh/a	lämpimän käyttöveden ostotarve kWh/a	primäärienergian ostotarve kWh/a
1A	3 185	5 730	7 800	28 417
2B	5 586	10 265	13 932	50 631
3C	3 026	4 804	6 717	24 731
4D	2 055	3 028	3 702	14 935
5E	8 783	14 801	17 901	70 525
6F	3 255	5 218	7 382	26 952
7G	6 840	12 531	16 800	61 491
8H	3 026	4 804	6 717	24 731
9I	4 290	7 238	9 770	36 207
10J	9 276	17 472	23 142	84 813
Yhteensä	49 322	85 892	113 863	423 432

Lisäksi kaikkien rakennusten yhteenlaskettu pihavalaistuksen sähkönkulutus on 9,9 MWh vuodessa ja autolämmityspistorasioiden 17,7 MWh vuodessa. Rakennuksien yhteenlaskettu vuosittainen os-
toenergiankulutus on 451 MWh.

Taulukossa 4 on esitetty aurinkoenergiajärjestelmän simuloinnin lähtötiedot ja tulokset.

Taulukko 4. Aurinkolämpöjärjestelmän energiantuotanto käyttöveden lämmittämiseen ja häviöt.

Talo	LKV nettotarve kWh/a	DS 2012 häviöenergiat kWh/a	LKV hankinta- tarve kWh/a <-- 2-edellistä	LKV aurinkolämpö		LKV ostotarve	
				kWh/a	% osuus hankin- tatarpeesta	kWh/a	kWh / netto-m ² ,a
1A	8 835	3 761	12 964	5 156	40	7 808	38
2B	16 040	7 364	24 072	10 134	42	13 938	36
3C	7 785	3 614	11 723	4 998	43	6 725	37
4D	4 628	3 210	8 031	4 325	54	3 706	34
5E	22 139	14 708	37 769	19 875	53	17 894	34
6F	8 415	3 702	12 468	5 097	41	7 371	38
7G	19 406	9 138	29 352	12 577	43	16 775	36
8H	7 785	3 614	11 723	4 998	43	6 725	37
9I	11 360	5 409	17 243	7 471	43	9 772	37
10J	26 821	12 769	40 707	17 570	43	23 137	36

10QHK\F801P_HK0750X07552P0031TEKNINEN LASKENTARUSKAIWASQ_BOININEN_ENERGIASELVITYS.DOCX

Liite 2. Granlund Oy energiaselvitys s. 6

ENERGIASELVITYS

Laat/Hyv.:
NKP/LL
Laadittu:
19.4.2013
Viim. päivitys:



6 (9)

3.7. Aurinkolämpöjärjestelmä

Jokaisessa asunnossa on käyttöveden lämminvesivaraajaa lämmittävä aurinkolämpökeräinjärjestelmä, joka mallinnettiin lähtötietoluettelon esimerkkilaitteen Jäspi Solar 300 – keräinpaketin mukaiseksi IDA ESBO laskentaohjelmaan. Aurinkojärjestelmän tekniset tiedot mallinnuksessa ovat:

- lämminvesivaraajan tilavuus $0,29 \text{ m}^3$ / asunto
- lämminvesivaraajan erityksen U-arvo $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$
- varaajan korkeuden suhde leveyteen on 5
- aurinkokeräimien pinta-ala 6 m^2 , josta aktiivista pinta-alaa $5,7 \text{ m}^2$
- aurinkokeräimet ovat tasokeräimiä tyypiltään Watt 3000 SU, EN-normin mukainen hyötysuhde valmistajan mukaan $0,792$ ja häviökerroin a_1 $3,78 \text{ W/m}^2\text{K}$ sekä a_2 $0,01723 \text{ W/m}^2\text{K}$
- aurinkokeräimet on suunnattu etelään ja kallistettu 50 asteen kulmaan vaakatasosta ylöspäin syksyn ja kevään lämmönkeräyksen tehostamiseksi (kesää varten paras kulma on 45°)
- simuloinnissa käytettiin ASHRAEn suomen 2001 sääätä, joka on tilastollisesti määritetty usean vuoden säätila
- simuloinnissa laskettiin aina yksi rakennus kerrallaan ja lämpimän käyttöveden kulutus oli laskennassa tasaista ympäri vuoden.

4. Rakennuksen energiakulutus

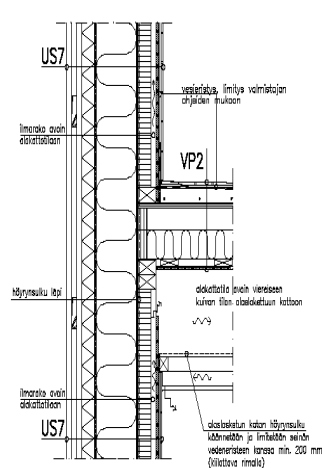
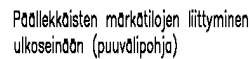
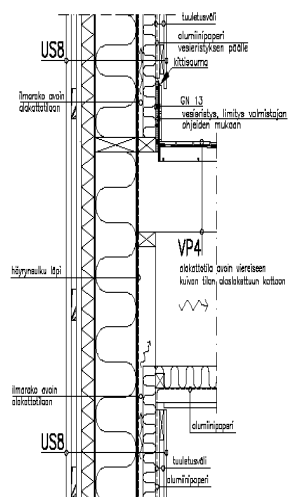
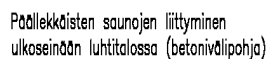
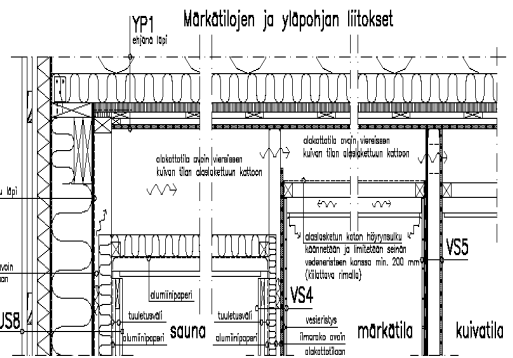
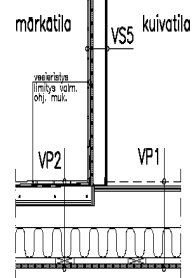
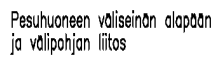
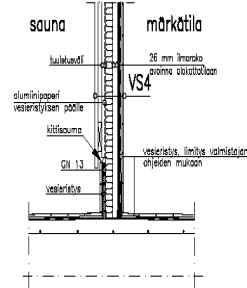
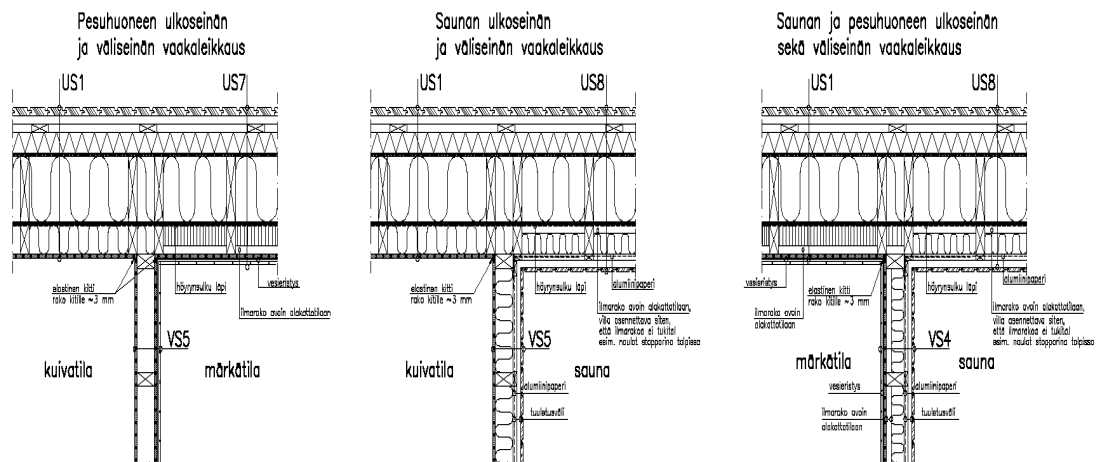
Energialaskelmien tulokset on esitetty taulukoissa 2 ja 3 ominaisenergiakulutuksien ja kokonaisenergiakulutuksien osalta. Taulukossa 4 on esitetty aurinkoenergiajärjestelmän simuloinnin lähtötieto- ja tulokset.


Taulukko 2. Asuinrakennuksien lämmitysenergian ja muiden energiakulutuksien pinta-alaperusteiset laskentatulokset.

Talo	lämmityssähköenergian ostotarve kWh/brm ² ,a	muun sähköenergian ostotarve kWh/brm ² ,a	lämpimän käyttöveden ostotarve kWh/brm ² ,a	primäärienergian tarve kWh/brm ² ,a
1A	12,6	22,7	30,9	112,6
2B	12,2	22,4	30,4	110,5
3C	13,6	21,6	30,2	111,2
4D	15,5	22,9	28,0	112,9
5E	13,9	23,4	28,3	111,5
6F	13,5	21,7	30,7	112,1
7G	12,3	22,6	30,3	110,9
8H	13,6	21,6	30,2	111,2
9I	13,2	22,3	30,1	111,5
10J	12,1	22,8	30,2	110,7
keskiarvo	13,3	22,4	29,9	111,5

IOQH1-FS011P_HK0275X007552P0031TEKNINEN LASKENTAIRUSKAIVASO_S0ININEN_ENERGIASELVITYS.DOCX

liite 3. Märkätiladetaljit



Kasvi /yht	Kortti/ille	Kortti/väri	Vuorokauden elokuukausi
30	1+	1	
Rakennustyyppi		Lupa no.	Pivatuus
Uudistaminen			Pohjaneperustus
Rakennuksen nimi ja osoite			Pivatuus 9876
 VASO/Soininen Soinintie 26 21110 Naantali			MÄRKITILÖIDEN DETALJEJA
			.
			.
			Mittakaava: 1:10

Narmaplan <small>RAK R41996</small>		Suunn. <small>04</small> Tj. <small>04</small> P. <small>04</small> Pöytäkirja 4/4, 11-02-2012 N. <small>04</small> 11-02-2012, N. <small>04</small> 11-02-2012	Pöytäkirja 4/4, 11-02-2012 N. <small>04</small> 11-02-2012, N. <small>04</small> 11-02-2012	Pöytäkirja 4/4, 11-02-2012 N. <small>04</small> 11-02-2012, N. <small>04</small> 11-02-2012	Pöytäkirja 4/4, 11-02-2012 N. <small>04</small> 11-02-2012, N. <small>04</small> 11-02-2012
Suunnitelma Tila	Hjo. Tila	Rak. Tila	Rak. Tila	Rak. Tila	Rak. Tila

Liite 4. Käytetty massa : Soudal Vapourseal höyrysulkutiiviste- ja liima

Tekniset ominaisuudet Perusaine akryyli

Lämpötilankesto Olomuoto tahna Kuivumistapafyysinen kuivuminen Ominaispaino 1,03g/mL 40°C...+ 1,03g/mL 40°C...+* Riippuu ympäristöstä lämpötilasta, ilmankosteudesta, materiaalista ym. Tuotekuvaus: Vapourseal on yksikomponenttinen plastoelastinen akryylidispersiopohjainen liimaus/tiivistysmassa, joka on tarkoitettu sisätilojen ilma- ja höyrytiivien liitosten tekoon kaiken tyyppisille höyrysulkumateriaaleille. Ominaisuudet: Ilma ja höyrytiivis. Erinomainen tartunta kaikille höyrysulkumateriaaleille. Hyvä tartunta kosteille, huokoisille pinnoille. Pysyvästi joustava. Hyvä rakenne, ei valu. Liutin ja isosyanaatti vapaa. UV:n kestävä. Ei sisällä pehmentinaineita. Käyttökohteet: Ihanteellinen ilmativiiden liitosten tekoon höyrysulkukalvoilla ja eri rakennusmateriaaleilla. Ilmativiit vierekkäiset liitokset vierekkäisissä rakenteissa. Takaa DIN41087 ja NBN EN13829 mukaiset ilma- ja höyrytviit liitokset Pakkaus: Värit: sininen Pakkauskoko: 310 ml patruuna Varastointiaika: 24 kuukautta avaamattomassa alkuperäispakkauksessaan viileässä ja kuivassa tilassa +5°C...+25°C lämpötilassa. Pinnat: Tyypit: kaikki höyrysulkukalvot kuten PE, PA, PP, alumiini, EPDM, PVC, Soudal SWS teippi,.. Hyvä tartunta myös (kosteille) materiaaleille kuten rappaukselle, tiilille, (solu)betonille, puulle, eristysmateriaaleille,.. Kunto: pintojen tulee olla puhtaat, pölyttömät ja rasvattomat. Primerointi: esikäsitteilyä ei vaadita. Suosittelemme yhteensopivuuskokeen suorittamista ennen varsinaisen työn aloitusta. Käyttöohjeet: Käyttötapa: käsi, paineilma tai akkukäyttöisellä puristimella. noin 5mm paksu sauma yhdelle pinnalle lähelle höyrysulkukalvoa. Levitä kalvo riittävän hyvin, jotta se myötäilee rakennelman liikkeitä. Älä purista liimaa täysin kokoon, vaan jätä se 1-2mm paksuksi. Minimisauman leveyden on oltava 25 mm. Käytön aikainen lämpötila: + 5°C...+ 50°C.

Liite 5. Käytetty ilmansulkuteippi: 921 cw clear cold weather sealing and repair tape 48 mm x 33 m

A 5 mil (125 micron) thin, strong and conformable transparent polyethylene film tape coated with a very high shear, UV resistant cold weather acrylic adhesive with excellent holding properties and cold stick. It has excellent resistance to moisture, acids, chemicals, alkalis, oils, abrasion and weathering. Primarily used for splicing polyethylene film. Also used as a weather seal for applying plastic storm windows, door-jams, window casings in low temperature environments as well as for film can sealing, ink container sealing and polytunnel repairs.

TECHNICAL DATA

IMPERIAL

Thickness: 5.9 mils (0.0059")

Adhesion:

Peel (PSTC#1): 75 oz/inch width

Hold(PSTC#7): 96+hrs @ 2.2 psi

Tack(PSTC#6): rolling ball 2 inch

Tensile: 12.5 lbs/inch width

Elongation: 250%

Minimum Application

Temperature: -10oF

High Temperature

Resistance: 175oF

METRIC

0.1499 mm

20.8 N/2.5 cm

15.2 kPa

50.8 mm

55.6 N/2.5 cm

250%

-23oC

80oC

Liite 6. OMAVALVONTATARKASTUSLISTA ENNEN TIIVIYSMITTAUSTA

Työ.nr:	1188	Asunto	
Työmaa:	VASO/SOININEN		

Tarkastetaan	rasti	pvm ja kuittaus	Huom.
- Höyrynsulku ehjä, teipattu ja massattu			
-SPU Ehjä + teipattu			
ulkoseinien läpiviennit (Sähkö+IV) tiivistetty + teipattu			
katossa olevat läpiviennit tiivistetty ja läpivientikumit asennettu			
Palokatko: kitattu Alareuna, pistorasiat, Palokatkon ja ulkoseinän liitos kitattu			
Ikkunat kitattu			
iv- kehikko paikallaan			
ULLAKKO			
SPU:n ja rungon väli vaahdotettu			
Läpiviennit vaahdotettu			
Höyrynsulku tiivistetty NURKISSA			
Viemärituuletus, radon, lv putket eristetty ja tiivistetty			
Vauriot SPU:ssa ja höyrynsulussa korjattu			
Tuulenhajaimet käännetty teipattu			
TIIVEYSKOETTA VARTEN			
TEIPATAAN: Viemärit vesiputket ikkunoiden reiät iv putki sähköputket			
hajulukoissa vettä			

Liite 7. TYÖNJOHTAJAN TARKASTUSLISTA ENNEN TIIVIYSMITTAUSTA

Työ.nr:	1188	Asunto	
Työmaa:	VASO/SOININEN		

Tarkastetaan	Huomautukset / Valokuvat	pvm ja kuittaus
Höyrysulku ehjä		
Parvekevalon läpivientikumi		
Ikkunat/ovet asennettu + uretaanit		
Läpivientikumit asennettu		
SPU teipattu + iv- kehikko		
ULLAKKO		
- Tuuletusputki /as		
- Radon / Talo		
- Tuuletusputki eristetty		
- Radon eristetty		
radon sähkö kattotuolissa		
Läpiviennit tiivistetty		
Tuulenohjaimet käännetty teipattu		
MUUTA HUOMIOITAVAA		

TURUN AMK:N OPINNÄYTETYÖ | Marko Rantanen

[illegible]